名家科普丛书

天体物理学前沿鸟瞰

方励之 著

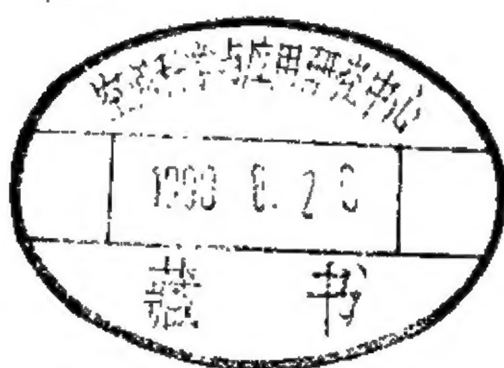
科学技术文献出版社



天体物理学前沿鸟瞰

TIANTI WULIXUE QIANYAN NIAOKAN

方励之 著



科学技术文献出版社

内 容 提 要

天体物理是一门基础学科，最近二十多年来有了长足的进步，赢得了越来越多的人的兴趣。为了有助于广大读者了解这一学科，需要对天体物理知识做些普及工作，本书正是适应这一要求，为各类读者所写的。本书简要介绍了天体物理全景，并特别着重介绍了这一学科发展至今的最重要的成就，以及当前的前沿课题。全书计分五章，即：引力物理和天体物理，宇宙学，高能天体物理，观测手段和方法的发展等。本书可供具有普通物理基础的广大读者（包括大学低年级学生，天体物理爱好者）阅读、了解，也可供大、中学校教师、研究生选择研究课题时参考。

天体物理学前沿鸟瞰

方励之 著

*

科学技术文献出版社出版

上海市新华印刷厂印刷

新华书店上海发行所发行　各地新华书店经售

*

开本 850×1156　1/32　印张 8.25　插页 2　字数 59,000

1989 年 2 月第 1 版　1989 年 2 月第 1 次印刷

印数 1—10,000 本

定价：（平装本）1.50 元

ISBN 7-5023-0645-5/P·13

序

“天体物理”一词，现在变得相当普及．特别是1987年初之后，知道“天体物理”的人更多了．因此，许多非科学工作者，常问我：“什么是天体物理？”一些物理同行但不从事天体物理研究的人，则常问：“最近以来天体物理有什么成就？”第三方面的问题来自刚刚走入天体物理领域的研究生，他们的问题是：“目前天体物理前沿有那些问题？”

本书的目的，就是回答上述三个问题．显然，这三个问题属于不同的层次，很难统一作答．一种妥协的安排是，对第一个问题有兴趣的读者，请重点读第一章，其后各章可依兴趣选择．想了解天体物理的新成就的人，可主要读第一章的后几节，以及第二、三、四章的前几节．对于天体物理研究生，或者，对于希望了解天体物理学的过去、现在和将来的整个全景的人，则请读全书．正因为如此，本书命名为“前沿鸟瞰”．也尽量作到是一本全景的鸟瞰．

因为是鸟瞰，不能不在许多方面采用粗略的描述．特别，熟悉天体物理学的人都知道，天体物理的领域应包括：

理论天体物理，

观测方法和手段，

恒星天体物理，

星系天体物理，

宇宙学.

对比本书的目录，就会看到，没有专章讨论以下问题：

非引力的理论天体物理问题，

非高能恒星天体物理问题，

星系天体物理问题.

事实上，有关这三方面的问题，在二、三、四、五章中都多次述及. 至于太阳物理学，或太阳系物理学，本书极少讨论.现在有两种看法，一种认为太阳和太阳系问题属于天体物理，一种则认为它已经属于空间物理，或者已成为像地球物理那样的独立学科.本书采取了后一种观点.

当然，不必讳言，本书之所以只列引力、宇宙、高能天体、观测这几章，是因为作者认为，这几方面是天体物理学前沿的重点，是最活跃的方面. 其实，在估计一个学科之未来时，从来是见仁见智的.因为，科学之所以有未来，正是由于充分包容着每个个人的 insight.

作　者

1988 年 3 月 17 日

于北京天文台

目　录

一、天体物理的过去和现在

天机不可泄漏

在中国有的朝代，明令禁止一般人学习和研究天文学，只有政府所设的天文机构中的官员有这种特权．但是，天文官员不得和一般人交往，否则荷以重罪．之所以如此严格，是怕“泄漏天机”．在中国古代，一直认为各种天文现象都有其对应的政治事件，研究天文的基本目的之一就是预言政治前景．正是由于这种极强的“实用性”，中国古代文献中有不少非常有价值的记录．

比如，有一种极引人注目的现象，叫做超新星爆发，即一颗原来很暗的星甚至看不见的星突然变得非常亮．这是很稀有的现象，平均上百年才能用肉眼看到一次．在欧洲的历史文献中，很难找到有关超新星的记载．但在中国文献中，却相当完全而详细．这是因为，中国古代占星术认为，超新星的出现预示着灾难．

公元1054年，正值宋朝，有一次有名的超新星爆发．在宋史文献中有不少记载：

1.《宋会要》：“至和元年七月二十二日守将作监致仕杨惟德言：伏覩客星出现，其星上微有光彩，黄色．”

2.《宋会要》："嘉祐元年三月，司天监言：'客星没'，初，至和元年五月，晨出东方，守天关，昼见如太白，芒角四出，色赤白，凡见二十三日."

3.《续资治通鉴长篇》："至和元年五月己丑客星出天关之东南可数寸，岁余消没."

4.《续资治通鉴长篇》："嘉祐元年三月辛未司天监言：自至和元年五月，客星晨出东方，守天关，至是没."

这些记录，内容相当丰富，有时间，有位置，有亮度，有变化方式，等等，这些是相当具有科学价值的.

但是，古代如此不厌其详的记录的动机，并不是为了研究超新星的物理，相反，却是为了卜占何处灾难将降临.根据史书，当时天文官员对于1054超新星爆发的卜占结果是："主崩". 有趣的是，果然，在不到一年的时间里，当时辽国的皇帝耶律宗真(即兴宗)驾崩了. 显然，这类天机，是绝对不能让一般的老百姓知道的.

这就是中国古代天文学的一个缩影.

人体中的超新星遗迹

近代科学发展后，证明占星术是没有根据的.各种天体现象是受自然规律支配的，并不对应地球上的政治事件.天文学研究的目的，不是也不可能是为了预测社会的未来.

随着占星术的否定，事情又发展到另一个极端，即认

为：天体现象和地面事件之间没有任何关系，和人的存在更没有关系.似乎世界上各类事物之间是绝对独立的，各类学科可以完全分开地研究，物理归物理，天体归天体，生物归生物，谁也不联系谁．至于人的存在，好像与天体关系更小，地球已经提供了我们生活的自然条件，何必去关心天上的星星呢？这种观念，在诗人的笔下就表现为：地球，应该赞美做“我的母亲”，而天空呢，只不过“充满眨眼的精灵”.

天体物理学的作用之一，就是证明上述的赞词或贬词，都是太狭猛了.实际上，在宇宙中，地球才只是一个极小极小的成员.地球不是孤立的，地球也不能孤立，它的成长、发展、变化，从最深处的地核、到最外缘的磁层，从生命的起源到人类文化出现，无一不是同周围天体的过去和现在有着千丝万缕的联系.

为了对这种联系有一个粗浅的印象，我们再举超新星来说明.虽然超新星并不预示是福是祸，但超新星的确与我们每一个人有关.现代天体物理已经确认，超新星爆发的一个重要作用，就是产生重元素．我们知道，地球上有各种化学元素，它们都是在天体演化过程中逐渐产生的.比铁重的元素，则大都是在短暂的超新星爆发事件中产生的.地球上现存的重元素，除了为数极少的是人工造的以外，全部都是超新星爆发遗留下来的残迹.铜器时代的鼎觚，中古炼丹家手中的汞制剂，传播文化用的铅字，原子能工业用的铀和钍，不外都是超新星“残迹”的制品.当然，人身体中的微量重元素，也同样是这类遗迹．天体

物理还能进一步告诉你，人体上的这种重元素遗迹，是50亿到100亿年前的超新星爆发遗留下来的.

人体中的其他化学元素，也同样都有一部自己的天体史.血红细胞中的铁，各种组织中的碳、氮，骨骼里的钙，呼吸着的氧，都是在恒星内部高温条件下形成的. 比较轻的元素，象锂、铍、硼，则来自极其空旷的星际环境中的宇宙线的作用.至于最轻的元素，如氢、氦，它们的起源要追溯到宇宙的早期.

可见，如果宇宙的演化有稍许的不同，今天也许我们就完全看不到地球上的如此繁荣的人类文明了. 这不是危言耸听!

极精巧的配合

生物或人之所以能存在，是依赖于许多天体的及物理的精巧配合.

现在介绍几个“精巧配合”的例子.

在宇宙间，目前有两类最常见的粒子：电子和质子.它们有个奇怪的性质：电子和质子的质量差别很大，可两者的电荷的绝对值却相同，即 $e_p=-e_e=e$. 其实，就原子、分子的存在而言，无须 e_p 与 $|e_e|$ 完全相同.早有人证明，即使两者电荷稍有差别，也可以有稳定的原子及分子.但是，从天体角度看，则不同了. 已经证明，那怕电子和质子的电荷值相差只有 $2\times10^{-18}e$，则宇宙的非电中性将导致静电排斥力超过引力，从而不能形成行星、恒星和

星系.没有星体也就没有生物赖以生存的条件. 所以,生物存在的一个必要条件是

$$\frac{e_p - |e_e|}{e} < 2 \times 10^{-18}.$$

可见，生物的存在比原子、分子的存在更依赖于宇宙环境.

再如,为什么电子和质子两者质量相差如此之大?仅从原子存在而言,也看不清这个差别.因为即使 $m_e = m_p$,氢原子照样可以存在.但是,这时原子核不再是不动的力心,而具有电子一样的运动速度. 电子及核都动的原子,是不能构成晶体的，因为晶体的骨架是由不动的核所构成的周期排列的格子. 没有晶态物质，也就没有有序结构,当然也就不可能形成高度有序的生物.所以，生物及人存在的又一个必要条件是，宇宙中必须演化出质量差别足够大的电子和质子.

第三个例子是为什么中子质量 m_n 比质子质量 m_p 略大,而不是相等?实际上,正因为 m_n 稍大于 m_p,所以才有 β 衰变,即

$$n \to p + e + \bar{\nu}_e,$$

其中 $\bar{\nu}_e$ 表示反电子中微子. 如若 m_p 稍大于 m_n,则将有下列逆 β 衰变,即

$$p + e \to n + \nu_e.$$

这种过程将使氢原子变得不稳定，其他原子也将由于同样的原因而不能稳定地存在. 如果 $m_n = m_p$,则宇宙早期将只有相同数量的中子及质子.在这种情况下,宇宙早期

的核反应将使全部中子及质子都结合成氦，以至也没有氢存在.总之，只要 m_n 稍稍变小，氢就不可能存在，也就没有今天看见的生物群了.

总之，宇宙间物理的或天体的因素的极小变化，就会极大地威胁到生物及人的生存.可见，哪怕只是为了弄清楚人本身的存在，我们也要面对整个自然界，整个宇宙.

天体物理学定义

当我们面对整个宇宙的时候，需要研究的就有以下四个基本问题：

1. 为什么自然界具有它所具有的规律？
2. 为什么宇宙是由构成它的这些东西构成的？
3. 宇宙间这些东西是如何起源的？
4. 宇宙是如何达到它现今所达到的组织状态的？

显然，为了回答这些问题，仅靠天体物理学是不行的.但是，至少有一点是清楚的，回答这些问题离不开天体物理学.这正是天体物理研究的最根本的目的.

上述四个问题的表述，哲学味道可能多了一些.如果想用更物理化的语言来表达，可以用《中国大百科全书》中"天体物理学"一条.它对天体物理学的定义是：

> 天文学的一个分支，是应用物理学技术、方法和理论，研究天体的形态、结构、化学组成、物理状态和演化规律的学科。

应当补充一点，天体物理学也是物理学的一个分支.1984

年，国际纯粹及应用物理联盟(IUPAP)设立了天体物理学委员会，平行于粒子物理、凝聚态物理等委员会．这标志天体物理在物理学中已占有重要地位．的确，近三十年来，有越来越多的物理学家投入天体物理研究．图1-1清楚地表明了一些重要的天文学现象是由什么职业的人发现的．在五十年代之前，物理学家所占比例还小；而在五十年代之后，物理学家成为主导成分．还有，从七十年代初到现在的十七次诺贝尔物理学奖中，有四次是颁发给天体物理研究成果的，这也从一个侧面反映了天体物理学的地位和作用．

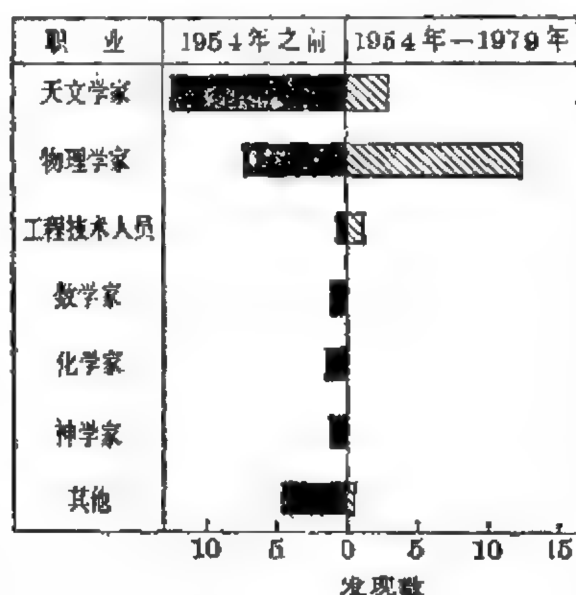


图 1-1　各种职业的人对天文发现的贡献

天体物理的可行性

天体物理学企图研究包括遥远天体在内的整个宇宙，而且，不仅研究宇宙的现在，还要研究宇宙的过去，甚至宇宙本身的创生．这会面临一个很大的困难：用什么方法才能探索我们不可能达到的时间空间范围？或者，更根本的问题是：有没有可能认识我们在时间空间上不可能

达到的天体？

这就是天体物理中的可行性问题．上下未形，何由考之？

很多古代思想家认为“考之”是不可能的．古希腊亚里士多德认为月亮之上的星星等完全不同于我们熟悉的火、气、水、土，是富有神性的世界，因此，不可能被我们这些世俗的人所认识．中国古代的标准答案之一是柳宗元的《天对》，其中写道：“彼上而玄者，世谓之天；下而黄者，世谓之地”．然而，什么叫玄，什么叫黄，语焉不详．这种天玄地黄的空论，是毫无自然科学价值的．

天体物理的可行性的关键，是物理规律的普适性，物质构成的普适性．

两千五百年前，有个比亚里士多德还要早的希腊哲学家，叫阿那克萨哥拉．他根据陨石推断，太阳是一块又大、又红、又热的石头，月亮是由泥土构成的．这个推理固然浅显，意义却深长．首先，他是用科学方法来推理，即根据观测到的陨石来判断天上的构成．其次，他的结论是天上的日月是与地球一样，也是由石头、泥土等构成的．

中国东汉时的张衡，也有过重要的、类似的贡献．张衡在解释日食成因时曾说：“夫日譬犹火，月譬犹水，火则外光，水则含景”．大意是：太阳像是火，月亮像是水，因为火会发射光，水会反射光．张衡这些推论的方法也相当科学，他是根据天体的光学现象（太阳发光，月亮反光），再对照地面上物质的光学特性（火发光，水反光）而得到结论．这样做，不仅说明天和地的物质构成是一样的，而且

说明地面物质所遵循的物理规律对天体照样适用．这些，正是天体物理学的可行性的最重要的依据．

阿那克萨哥拉、张衡等人的思想，都没有后继者给以发扬光大．在漫长的古代历史中，这些富有开创性的思想闪光，好像暗夜里出现的超新星爆发一样，自生而又自息了．直到物理学发展之后，才重新认识到这种可行性的根据．

第一步是由牛顿 (I. Newton) 的万有引力理论带来的．牛顿强调他发现的规律的普适性：用同样的规律，即可解释落体的性质，也可解释行星的开普勒 (J. Kepler) 定律．更有名的事件当然是海王星的发现，它充分证明了万有引力的普适力量．

第二步是由光谱分析带来的．1859年，德国物理学家基尔霍夫(G.R.Kirchhoff)有一次在研究太阳光谱时，让太阳光束通过食盐的火焰再进入光谱仪．他发现，在太阳光谱中出现了暗线；并且，暗线的位置恰与太阳光谱中原有的两条暗线重合．他从而断定：太阳上必定存在食盐中含有的钠元素．直接证明了构成天体的物质成分，和地球的物质成分是相同的、类似的．目前已对太阳光谱中的上千条暗线作了证认，在太阳上找到了67种地面上的元素．这就是物质构成上的普适性．

应用这种物质构成和物理规律的普适性，根据星体的光谱，我们可以推测星体上各种物质的含量比，星体的运动速度，星体转动的快慢；星体表面的压力，温度，磁场，等等．这就奠定了天体物理学的基础，使之成为一门

可观测可实验检验的科学.

新的观测视野

天体物理最主要的观测工具(或者实验工具)就是望远镜. 因此,改进望远镜的各种性能,就会使我们得到更多的天体信息.下面我们用几个例子来说明已经达到,或者即将达到的观测水平.

图1-2表示天体位置测量精度的发展,古希腊的伊巴谷的观测精度约3分,牛顿之前不久的第谷 (T. Brahe Tycho)的观测精度为半分.美国海军天文台达到了比0.1弧秒还好的精度. 即将发射的天体测量卫星,也叫伊巴谷,它的精度将达到千分之二弧秒.

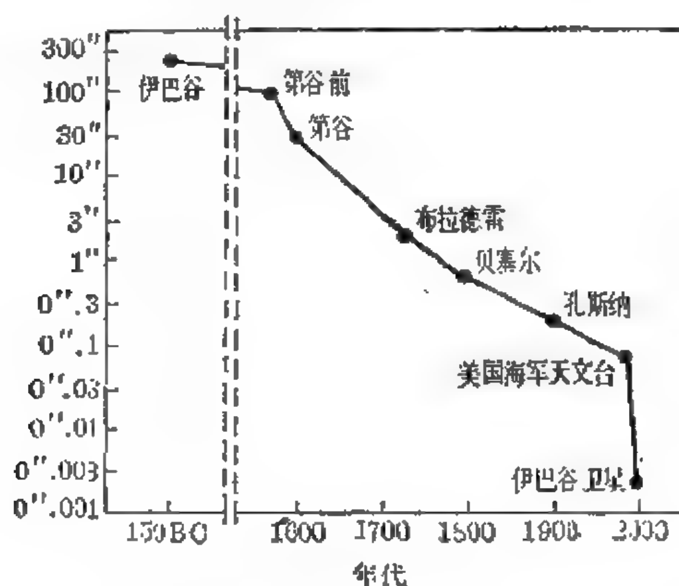


图 1-2 天体位置测量精度的发展

图1-3表示光学观测的灵敏度的发展.用肉眼最多只能看到可见光范围内的六等星.四十年前启用的200英寸

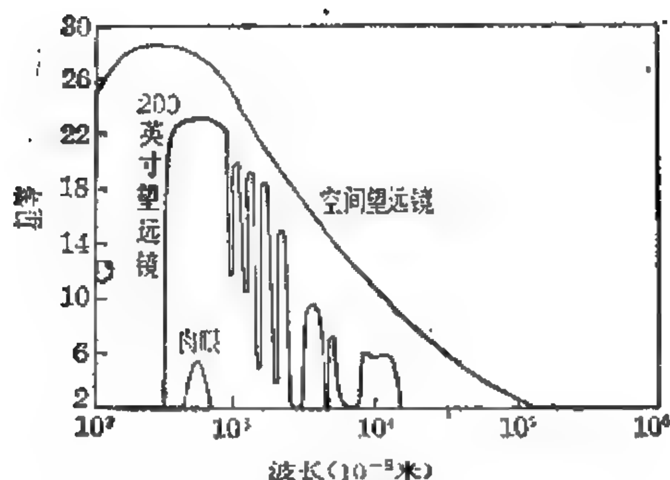


图 1-3　光学观测的灵敏度的发展

望远镜，能观测 23 等星，比肉眼提高七个量级(每五个星等相差两个量级)．即将发射的空间望远镜，在可见光波段又提高了两个量级．

图1-4及1-5表示波段上的发展．本世纪以来，除了能观测天体的可见光波段的辐射外，还扩展到其他波段．图 1-4 是各个波段上在不同年代所达到的分辨率．由图可

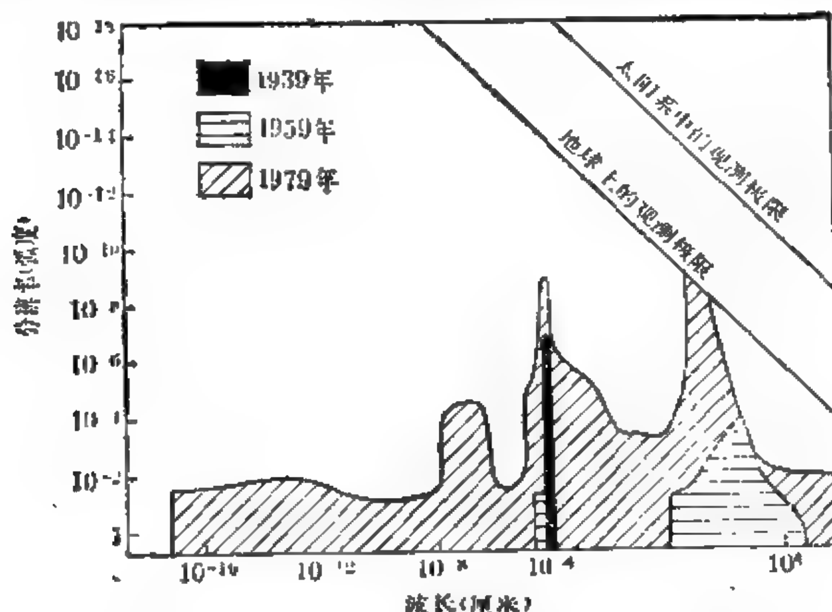


图 1-4　在不同年代不同波段上的角分辨率

见，今天各种观测手段几乎已覆盖了整个电磁波波段，其中分辨率最高的两个峰，一个是光学，一个是射电．各个波段上的灵敏度由图1-5表示．从中可以看到，在光学、射电及X射线几个波段上，各种观测装置所达到的灵敏度．

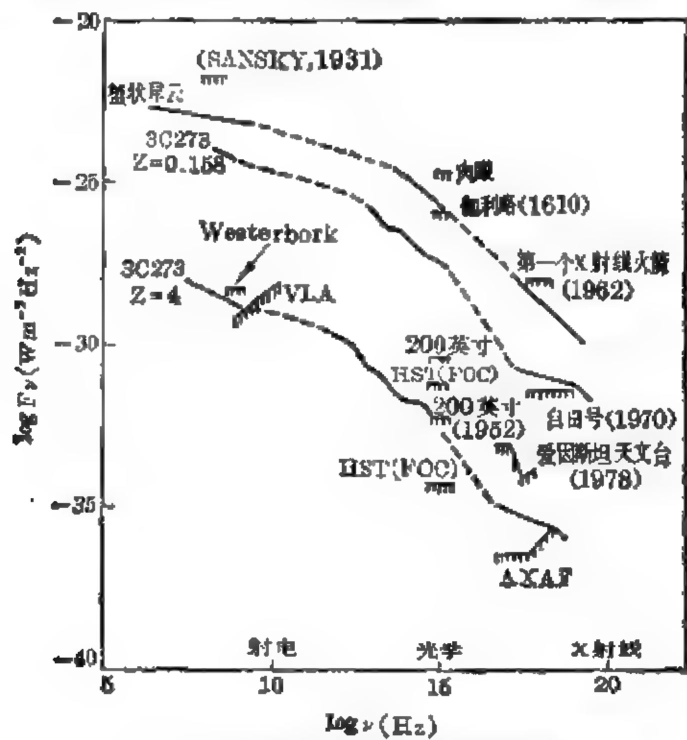


图 1-5　不同年代不同波段上的灵敏度

各种新型的装置中，往往都用了新型的物理实验手段．一个总的趋势是，天文观测和物理实验之间的相互渗透越来越多．研究中微子时，天文观测站与物理实验室已合二为一了．

我们知道，有的天体不仅发射光，也发射中微子．像超新星爆发，它主要发射中微子，光子反而是次要的．所以，早就有人倡导发展中微子天体物理学，其任务是观测和分析天体发射的中微子．当1987年2月23日大麦云中的超新星爆发时，的确观测到了它发射的中微子．日本神

冈、美国IMB等观测站，接收到了来自大麦云超新星的中微子信号.

不过，神冈、IMB等，都不是为观测天体中微子而建造的.它们原来的目的是为了测量质子的寿命.自从大统一理论预言质子并不绝对稳定之后，有许多小组企图测量质子的衰变.由于质子的寿命非常长，只有在很深的地下实验室才有可能进行这种实验.因为，地下实验室可以排除宇宙线的干扰，进行“干净”的测量.当然，这种实验室并不绝对“干净”，因为中微子可以穿透整个地球，可以干扰地下实验室的测量.因此，对于测量质子寿命而言，中微子信号一直被看做不受欢迎的东西.至今，质子寿命实验尚无定论，但由于收到超新星的中微子，这些本来不受欢迎的信号却开创了一个时代——中微子天文学时代.无心插柳柳成荫了.

可见，地下的物理实验室，几乎可以同时兼作天体中微子观测站，这就是一身兼天文和物理两重功效的实验

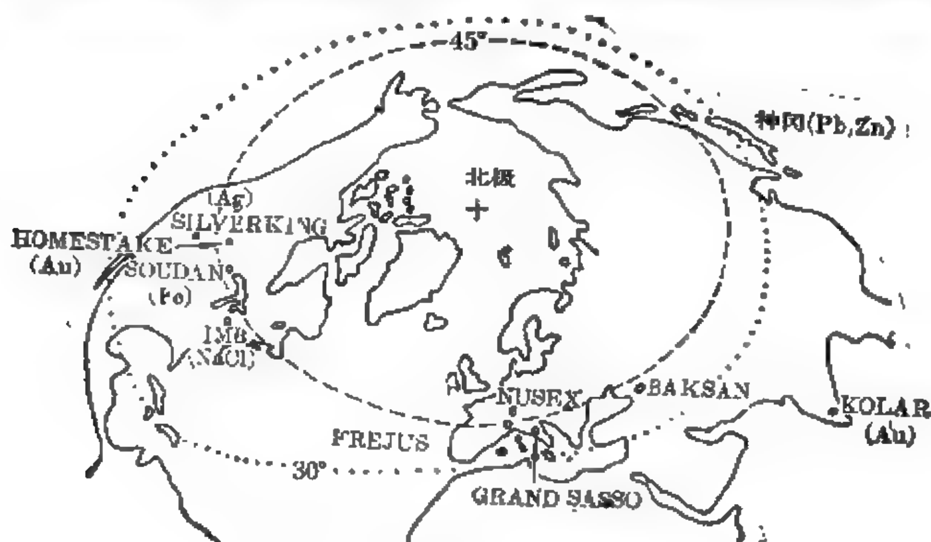


图 1-6 中微子观测站在地球上的分布

室.图1-6标出地球上现有的地下观测站的位置.它们大都设置在一些废弃的矿井里.如日本神冈是铅锌矿,印度Kolar是金矿,美国IMB是盐矿,Soudan是铁矿,Silverking是银矿,Homestake 是金矿. 欧洲的几个观测站不在矿井下,而在山洞里,Frejus及Nusex都在阿尔卑斯山底.意大利的Grand Sasso 是在亚平宁最高峰 Corno 峰下的山洞里.

随着中微子观测进入天体物理学的时代的到来,天文学家必须上山去观测的时代也结束了.

全面渗透的趋势

天文观测和物理实验之间的渗透,还只是事情的一个方面.实际上,天体物理学与其他各物理分支之间的渗透是全面的.

二十年前,天体物理的课题主要限于两个方面:一是分析恒星光谱,来讨论恒星大气结构;一是以热核聚变为基础,研究各种恒星的内部结构. 所以,天体物理与其他物理分支,或与物理主流,都联系不多. 今天的面貌完全不同了,几乎物理学的所有方面,都可以在天体物理的文章中找到.如引力和时空,粒子,原子核,等离子体,固体,原子和分子,辐射和激光等,都渗进了天体物理.

出现这种局面,也是经过一段曲折的.

本来,天体物理就是天文现象和物理规律两者结合的产物.但在一个时期里,天体物理与其他物理分支多少

有点“疏远”．一个有名的例子是有关中子星预言．1932年发现了中子，随后不久，就有人从理论上论证了存在中子星的可能性．1934年，更进一步猜测中子星可能是超新星爆发的产物．到1939年，对中子星的结构及稳定性已有较深入的研究，预计它们的质量与太阳同量级，但体积很小，直径大约为十到数十公里，密度高达10^{14}克/厘米^3．尽管对中子星的预言完全依据实验室已检验过的物理理论，可是，因为它的物性太不寻常了，所以这些预言长期受到冷遇．有的天体物理学家讥讽道：“究竟有多少天使能在中子星头上跳舞呢？”

中子星假说的遭遇，反映了当时天体物理界对其他物理所抱的态度．所以，那一时期，根据物理理论对天体所做的“奇特”预言，没有引起什么反响．关于存在黑体谱的微波背景辐射的预言被忘掉了，关于黑洞的假说被搁置了近三十年，等等．直到1967年，天文观测意外地发现了脉冲星，紧跟着被确认为一种中子星，才结束这种局面．所以，脉冲星的发现，以及六十年代开始的一系列天体物理重大发现，在认识论上的意义之一就是打开了天体物理与整个物理之间全面渗透的大门．

新发现还使人感到新现象的时标越来越短，而光度密度（光度与体积之比）越来越大．第一颗脉冲星CP1919的周期只有1.3秒，光度密度约10^{17}尔格/（秒·厘米^3）．七十年代发现的黑洞候选者之一天鹅座X－1，光变时标短到数毫秒，而光度密度则高达10^{19}尔格/（秒·厘米^3）以上．八十年代又发现了周期约1毫秒的脉冲星．以

往常常用"天文数字"来形容数字之大，现在已经完全不正确了：天文数字有的很大，有的却很小. 还有一种成见，认为天体很少有变化，或者变化很慢，这也不对了. 比如，在中国有记载的三千年历史中，只不过记录了约百颗新星或超新星爆发现象. 可是，自从七十年代 X 射线天文学、γ 射线天文学兴起之后，仅仅 γ 射线爆发就已经记录

表 1.1　天体物理与各物理分支之间的联系

物理分支	天体物理课题
粒子物理	宇宙的起源 粒子的生成 宇宙早期的相变 暗物质 致密星 超新星爆发
核物理	核合成　元素起源 恒星的结构和演化 超新星 中子星冷却 太阳中微子问题 宇宙线
原子分子物理	里德堡原子 星际分子 天体化学 星际微波激射源
等离子体流体	射电源结构 超新星遗迹 脉冲星磁层 星风 天体喷流 吸积过程 宇宙粒子加速机制
凝聚态	星际尘埃 白矮星 中子星结构

到约百次了．总之，高能、快速、致密、强场、爆发等等，就是六十年代以来的这些新发现的共同特征，它使人们对天体传统印象为之一新．高能天体物理，相对论天体物理，核天体物理，等离子体天体物理，原子分子天体物理，就在这种形势下应运而生．

在表1.1中，我们列出天体物理与各个物理领域之间的联系．应当申明，这个表并不是完全的，它只是一个粗略的轮廓，一定有遗漏．尽管如此，也会给人留下相互渗透之广泛和深入的印象．

作为实验室的宇宙

不少读者一定会注意到，在表1.1中没有列举引力物理、时间空间物理．这并不是由于它们与天体物理联系少，相反，是太多了，以致不能分开引力物理与天体物理．可以说，引力时空物理就是把天体或整个宇宙作为实验室而发展起来的．

牛顿引力理论的建立就是一个典型．在牛顿时代，要想从物理实验室中得出万有引力概念是不可能的．唯有依靠关于行星运动的精密观测和研究，才能创建整个力学体系．牛顿建立了他的基本理论之后，直到正确的月地距离等数据完全符合了他的预言，他才敢发表他的《自然哲学之数学原理》．这个事实本身，最好地说明了他的概念依托在那里．

至于爱因斯坦 (A.Einstein) 的引力理论——广义相

对论，它的验证和它的应用，几乎全部都在天体物理范围中．在下一章，我们将专门介绍这方面的进展．

近来，不仅引力物理把天体或宇宙作为一个实验室，而且其他物理分支，特别是粒子物理学，也在利用这个宇宙学．两个有名的例子是：

1．利用宇宙总质量密度给出中微子静质量的上限，该上限与现今实验室给出的结果相一致．

2．利用宇宙早期核合成过程给出中微子种类数上限．在八十年代初期，它是一个最强的上限，到1985年，高能粒子实验结果才达到同样水平．

这些结果都说明，天体环境、宇宙整体是物理学的一个有效的有独特作用的实验室．借助这个实验室，我们可以看到地面实验室中看不到的现象，获得从地面实验中不易获得的概念．所以，从基础物理角度看，天体物理研究也是极富有价值的．从下面列举的一些问题，就可以明显地感到它的基础性(或根本性)：

为什么太阳发射的中微子比预期值小得多？

γ射线爆发、X射线爆发的机制是什么？

为何许多射电源具有规则的成双结构？

类星体、活动星系核的能源是什么？

为何某些星系等天体系统结构非常有序？

为何星系、星系团、超星系团的分布具有相似性？

为何我们周围极少有天然的反物质？

为何微波背景辐射有如此高的各向同性？

为何各种物理常数在很大的时空范围中是不变的？

为何我们所生活的宇宙是三维空间一维时间?

看来，这些问题中，不少是可以用常规理论来解决的.但是,也不能完全排除，其中有些问题可能孕育着物理学的重大突破.

二、引力物理学前沿

引 力 是 主 导

现今的自然界，有四种基本的相互作用：强相互作用，电磁相互作用，弱相互作用，引力相互作用.其中，引力的作用最弱．如果强作用的强度为1，则电磁作用约为10^{-2}，弱作用约为10^{-10}，引力作用只约有10^{-40}.所以，在绝大部分的物理学研究（特别是实验室的物理学研究）中，引力完全可以忽略.但是，在讨论天体物理学时，引力不仅不可以忽略，而且一定要设立一章专门讨论.其原因有二：

第一，引力理论研究是同天体研究分不开的.天体系统和宇宙整体是引力物理学的一个主要的实验室．创造理论，以及检验理论，都要依靠这个实验室.因此，推动引力物理发展，已成为天体物理学的最基本的一项内容.

第二，在天体或宇宙的尺度上，引力超过其他所有相互作用，成为主导者．这是因为引力相互作用只有吸引，没有排斥.所以，越大的体系，相互作用越大.强、电磁、弱这几种相互作用，都是有吸引也有排斥，在大尺度上，这些相互作用自身相互抵消了，以至引力超过其他所有作用，成为天体以及整个宇宙的动力学的支配者.

因此，在研究具体的天体现象之前，必须专门考查引力理论的现状，以使我们在应用这一理论研究天体时，无后顾之忧.工欲善其事，必先利其器.

普 适 性

引力最基本的特征是普适性，或万有性，即任何物体无例外地都参与引力相互作用.

牛顿最早认识到这种性质.早在1684年11月，在《自然哲学之数学原理》的前身《论运动》的初稿中，牛顿还只考虑太阳对行星的引力，并没有考虑任何其他物体的引力.即认为，只有太阳有引力，而其他物体没有.依照这种理论，行星绕太阳的轨道应当是一个严格的椭圆. 然而，观测证明，行星轨道并不是严格的椭圆，并且“任何一颗行星的轨道依赖于其他所有行星的合成运动”.这个现象仅用太阳引力是无法解释的. 这样，在1684年12月《论运动》的修改稿中，牛顿开始写到只有计及“行星彼此之间的作用”，才能说明行星运动.这等价于说，引力不仅是太阳的属性，同样也是行星的属性. 到1685年，牛顿更进一步写道：“依此定律，一切物体必定相互吸引”. 这就是万有引力理论的起源.该定律很简单，任何两个物体之间都有相互吸引力，其值为

$$F=\frac{Gm_1m_2}{r^2}. \qquad (2.1)$$

其中 G 为万有引力常数，m_1、m_2 分别为两个物体的质

量，r 为两者距离.

为什么引力有此普适性(万有性)？在牛顿理论中找不到答案.

爱因斯坦给了进一步的解释.他认为，所谓引力，是由于时空性质不同造成的，当物体在不同性质的时空中运动，有不同的表现，它等价于物体受了力.这种解释，很容易说明引力的普适性，因为任何物体都要在时空中运动，所以没有任何物体能逃避引力的作用.这就是爱因斯坦广义相对论的基本观点.它可以概括为：引力理论即时空度规理论.

爱因斯坦理论的最基本的实验依据之一是：各种物体的引力质量都等于它的惯性质量，或者表示为

$$\frac{\text{引力质量}}{\text{惯性质量}}=\text{普适常数}. \tag{2.2}$$

这个普适常数与物体的性质无关.因此，引力普适性的正确程度，可以通过对上述论断的实验检验水平来表示.

事实上，在牛顿之前，就有人作实验来检验引力普适性，在有名的比萨斜塔实验中，研究不同材料组成的球从塔上落到地面的时间，发现：如果让不同的球同时从塔顶下落，则它们同时到达地面.即下落时间与物体的具体特征无关.实质上这就是上述的普适性.不过当时并没有直接认识到这一点.

牛顿本人则自觉地进行了类似的实验.当时精度并不高，他只证明在10^{-3}的精度上，公式(2.2)是成立的.后来，贝塞尔(F.W.Bessel)作过更仔细的测量.上世纪末，

匈牙利物理学家厄缶(R.Eötvös)对(2.2) 进行了长期的实验. 他证明,在精度 10^{-9}上,式(2.2)仍是正确的. 这个记录又保持了六十多年,直到本世纪六十年代初,才被新的实验结果超过. 美国普林斯顿的狄克(R.H.Dicke) 改进了厄缶实验,使精度达到 10^{-11}.随后不久,苏联莫斯科的布拉金斯基(V. B. Branginsky) 的实验把精度提高到 10^{-12}。

更高精度的实验,正在计划中.其中之一是精密监视月亮和地球之间的距离的变化. 按式(2.1),在太阳的引力作用下,地球和月亮应当有完全相同的加速度,就像比萨斜塔实验中不同的球有同样的加速度一样. 如果地球和月亮的加速度稍有不同, 则地球和月亮之间的距离就会有系统性的变化."阿波罗14号"登月飞行时,已经在月亮上放置了一个角反射器, 使我们能用激光方法精确测定月地距离,目前的精度是10厘米. 相信在不久将来,还可以提高约十倍, 即我们可以监视月地之间 1 厘米左右的微小变化.

另外一个计划是到空间实验室去进行厄缶实验, 空间环境可以消除许多地面实验中的不利因素. 一个方案是在空间飞船中作实验, 估计精度可达10^{-15}, 即比狄克和布拉金斯基的结果提高 3、4 个量级. 更好的实验应在无引力自由飞行器中去做,在这种条件下,可再提高 3 个量级,精度达到10^{-18}。

平方反比律的再检验

在公式(2.1)中，F 反比于距离 r 的平方，即 $F\propto r^{-2}$. 这也是引力的一个基本性质.甚至在中学物理教科书中，也强调这个特性.然而，我们要问：有没有很好的证据证明这个平方反比性质？结果发现，它的证据的精度远比式(2.2)差.

牛顿在发表他的理论时曾说："在1665年开始……我从开普勒关于行星周期是和行星轨道中心的距离的 3/2 次方成比例的定律，推出了使行星保持在它们的轨道上的力，必定要和它们与绕行中心之间的距离平方成反比；而后，把使月球保持在它的轨道上所需要的力，和地球表面上的重力作了比较，并发现它们近似相等." 这句话有两层意思，一是与"距离平方成反比"，一是"近似相等". 也就是说，牛顿认为利用与距离平方成反比的万有引力，就可以统一地说明许多运动的原因.不过，这个论断还只有"近似相等"水平上的观测证据. 这就是三百年前的状况.

三百年后的今天，人们早已不是在"近似相等"水平上使用平方反比律，而是在"严格水平"上使用了. 可是，许多人早已忘了，平方反比的根据并没有认真地分析过. 直到 1976 年，美国物理学家朗(D.R.Long) 的一篇文章，才使许多人醒悟过来.那年，朗宣称：他的实验证明，万有引力在数十厘米的范围上并不服从反平方律！后来证明，

朗的结果并不正确．但是，这个事件促使人们重新检查反平方律的基础．

具体说来，在太阳到地球这样的大距离上，反平方律有较好的证据，r^{-2} 中的因子 2 在精度 10^{-8} 的水平上成立．另外，根据对火箭及人造卫星轨道的研究也可以证明，在10^4公里左右的距离上，因子2的精度也已有 10^{-8}．可是，在较小的距离上精度相当低．在数厘米到 1 米的距离上，精度为 10^{-3}；在 1 公里左右的距离上，精度只有 10^{-2}．

现在世界上有不少小组，正在致力于提高这个精度，或者企图发现在什么精度上反平方律不正确．这个实验很难做，特别在较小的距离上．因为较小的距离，要用较小的物体；而物体越小，产生的引力也越小，难于准确测量．另一个困难来自引力不能屏蔽．做精密实验就怕干扰，可以说抗干扰是设计实验的一项主要内容．对于电磁干扰，不难加以屏蔽，只要用金属材料把实验室“包围”起来就可以了．但是，对于引力干扰，是不可能屏蔽的，只能设法抵消或者避免．比如，在做精密的引力实验时，街上的过往车辆就是一种令人讨厌的干扰源．因此，有人把实验室搬到人迹稀少的山洞里，或矿井下．然而，山洞、矿井也并非理想的环境，因为那些地方常常有地下水，尤其是一些看不见的地下水流，它们会给实验带来难以估计的误差．

尽管实验如此困难，还是有越来越多的人投入这项工作．因为，现在认识到它的意义不仅是被动地验证反平

方律，而且可能为整个物理学的统一提供新的启示.在当前的一些新理论中，预言存在一些新的作用很弱的粒子，这些粒子可能破坏严格的反平方律.所以，关于反平方律的研究，有助于寻求统一的途径.

到目前为止已经发表了一批结果. 表 2.1 列举了各个结果的主要数据.其中的 ε 的定义是

$$F \propto R^{-2-\varepsilon}. \tag{2.3}$$

表 2.1 对引力反平方律的检验

检 验 者	距 离 范 围	ε
朗(美)	5～30厘米	$(20\pm4)\times10^{-4}$
台北小组	15厘米～10米	$(0\pm200)\times10^{-4}$
鲁特(美)	7～10厘米	$(-8\pm10)\times10^{-4}$
潘诺夫等(苏)	0.4～1米	$(-6\pm40)\times10^{-4}$
平川等(日)	3～11米	$(-21\pm62)\times10^{-4}$
帕克等(美)	1.9～2.7米	$(-140\pm210)\times10^{-4}$
张平华等(中)	4～5厘米	$(85\pm136)\times10^{-4}$
斯塔西等(澳)	15厘米～4公里	$(13\pm1.3)\times10^{-4}$
斯皮罗等(美)	2～5厘米	$(0.1\pm0.7)\times10^{-4}$
纽曼等(美)	5～105厘米	$(-1\pm3)\times10^{-4}$

从表 2.1 中看到，只有朗及斯塔西(F.D.Stacy)的两个实验结果是肯定 ε 不为零.然而，这两个实验的可靠性值得怀疑.纽曼(M. J. Nemwan)的实验方法与朗的相似，却直接否定了朗的结果. 澳大利亚地球物理学家斯塔西等人的实验方法是测量数公里深的矿井里的地球引力，用它们和地面上的引力相比较.不过，这个方法要假设地球是个均匀的球体或者椭球体. 所以，一般认为，斯塔西的第一批结果并不证明反平方律不对，而只能证明地球是不

均匀的.

广义相对论的经典检验

按照广义相对论,只在引力场很弱时,牛顿引力公式(2.1)才适用.在太阳系中,行星的运动性质,绝大部分都可以在牛顿引力理论中加以分析. 但也有三个有名的实验,说明牛顿理论不及广义相对论.它们是:光线偏折;时间延迟;行星近日点进动.这三个实验常称为广义相对论的三个经典检验.

所谓光线偏折,是指光在引力场中传播时,一般不可能走直线,而要发生弯曲.比如在太阳引力场中传播的星光,就要发生弯曲.一束通过太阳表面附近的星光,偏转角为1″.75. 1919年爱丁顿(A.S. Eddington)领导的观测队,第一次定量地证实了光线弯曲的预言.在那年的5月29日,他们在西非的普林西北岛上,拍摄了日全食时太阳附近的星空照片,然后与太阳不在这个天区时的星空照片相比较,就可以测量出光线弯曲的数值.当时的测量精度很低,只约有10%.

较精确的测量,是用射电干涉方法测量类星体的光线在通过太阳引力场时的偏折. 从1969年开始进行这一测量,经过不断的改进,目前的精度已达约1%,测量结果与理论预期相符合. 图2-1表示了实验发展的概况.

所谓时间延迟,是光在引力场中传播时,所用时间也会发生变化.具体实验方法是:从地球上利用雷达发射一

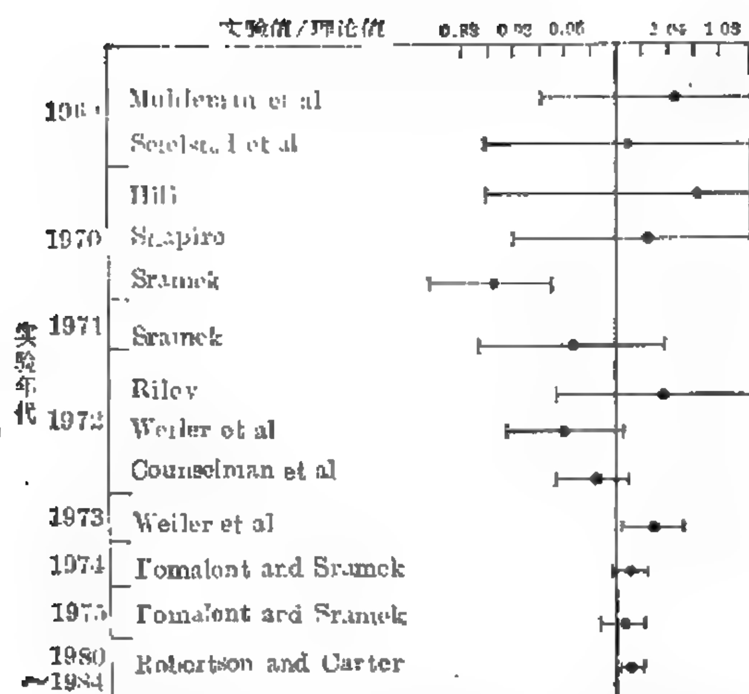


图 2-1 用射电干涉方法测量光线在太阳引力场中的偏折

束电磁波脉冲，这束电磁波到达其他行星后，将发生反射，然后在地球上接收回波，再测量它来回一次的时间．我们将发现，电磁波来回一次的时间决定于电磁波的传播路径是否要经过太阳附近引力场．当电磁波的路径靠近太阳时，传播时间要变长．例如，地球与行星之间的雷达传播时间延迟可达到240微秒．因为行星表面太复杂，影响测量回波到达时间的精度，所以，利用人造天体作为反射物可以得到更精确的结果．图 2-2 表示这一实验的发展情况，目前已在10^{-3}的精度上证明广义相对论的预言与实验相符．

第三个检验是行星近日点进动．按照牛顿的引力理论，在太阳引力作用下，水星的运动轨道将是一个封闭的椭圆．但实际上，水星的轨道并不是严格的椭圆，而是每

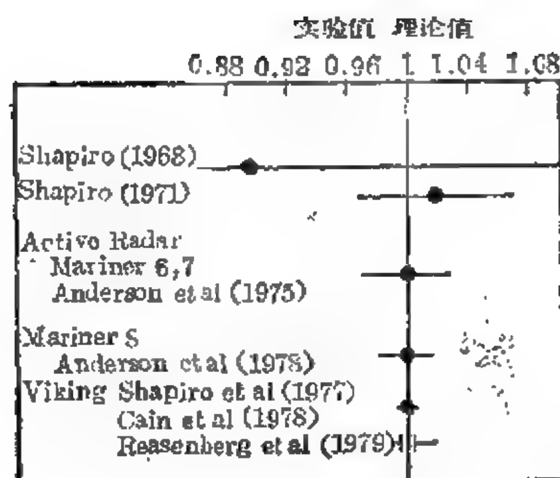


图 2-2 时间延迟实验的发展

转一圈它的长轴也略有转动，这称为进动．进动的原因有好几个．广义相对论给出的进动很小，对于水星只有每一百年 42″.98．按现在的测量值，在约 0.5%的精度上，符合于理论．但是，这个检验有一个潜在的问题，即要求太阳是球对称的，不能是扁的．

1966年，狄克等宣称，太阳的扁率（即最大半径与最小半径的相对偏差）高达 $J_2=(2.5\pm0.2)\times10^{-5}$，这将导致 3″/百年的进动．所以，如果这个测量正确，则广义相对论的预言就与观测不符．以后的测量结果是 $J_2<5\times10^{-6}$．目前最好的结果是 $J_2\sim 6\times10^{-6}—10^{-7}$．图 2-3 中

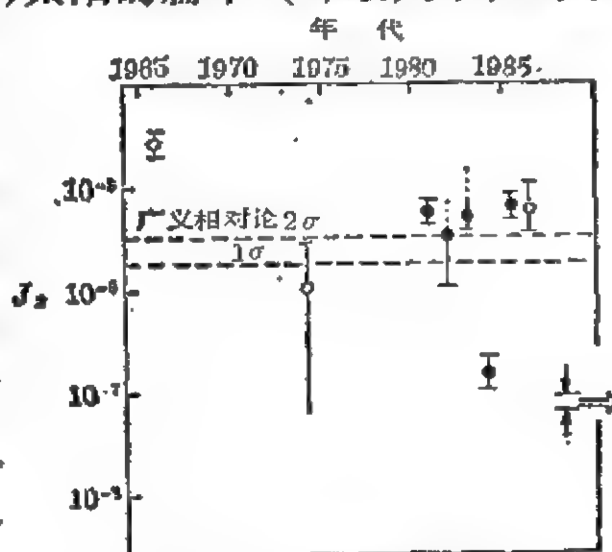


图 2-3 对太阳扁率测量的进展

给出各个时期对 J_2 的测量结果及其精度．从已有的结果

看，还不能说广义相对论的结果与观测有矛盾.

引力的"磁性"

三个经典的检验只涉及引力的"电"分量性质. 这就是说，上面的实验主要反映牛顿引力势(2.1)应当用更准确的势来表示. 用势场来表示的是"电"分量，就像电荷在其周围引起静电势一样. 在牛顿引力论中，引力只有这种"电"分量. 广义相对论更重要的结论之一，是引力也应有"磁"分量，它是完全没有牛顿引力论的对应的.

电磁场告诉我们，运动的电荷不仅有电场，同时也有磁场. 例如，作圆周运动的电荷具有磁矩.磁矩与磁矩之间的作用，是一种典型的磁相互作用. 类似地，运动的质量将引起引力的"磁"分量.旋转的物体会有引力"磁"矩. 两个旋转物体之间会有引力"磁"矩的相互作用.这一点，在牛顿理论中是完全没有的. 按牛顿引力论，两个物体的引力只决定于两者的质量，并不与两者旋转运动方向有关. 因此，检验是否存在引力"磁"分量，成为区别牛顿引力论及广义相对论两者的关键之一.

检验方法是利用旋转物体.例如，在空间放置一个陀螺. 按牛顿理论，地球引力不产生力矩，陀螺方向应保持不变. 但是，按广义相对论，陀螺的旋转与地球的旋转之间有引力"磁"作用，所以，陀螺的方向一般说要发生进动.进动方向及速率决定于地球的转动.这种相互作用十分像原子物理中的自旋-自旋相互作用. 自旋-自旋相互

作用很微弱，只引起光谱中的超精细结构. 陀螺与地球之间的引力“磁”作用也十分微弱. 如果将陀螺放置于600公里的高空，最大的进动率为0″.044/年.

美国斯坦福大学物理系的一个小组，正在进行这一项相对论陀螺实验. 他们准备发射一个空间装置，其中有四个陀螺. 陀螺由石英球制成，直径约4厘米，所有陀螺都置于1.6K的低温，使方向精度达到每年不大于0″.001. 这样，就有可能测出广义相对论的磁效应.

引力波探测

电磁波是一种电场与磁场之间相互变化的运动形态. 引力有“电”分量和“磁”分量，所以，也应当存在引力波. 这个预言早在1918年就由爱因斯坦提出了. 但是，至今还没有直接探测到引力波. 这是由于引力波的作用实在太弱了，目前的实验条件还没有达到所需的灵敏度. 尽管如此，近二十年来，探测引力波的工作受到越来越大的关注. 因为，在经典物理范围，即非量子物理范围内，未被直接证实的最重要的预言，只剩下引力波了. 因此，探测引力波常被称为最后一个有待完成的经典物理实验.

刺激加紧探测引力波的另一个因素，是在天体物理中已发现了存在引力波的定量证据. 1974年发现了有名的脉冲星双星PSR1913+16，这是由两颗致密星组成的双星体系. 因为这个双星的周期很短，只有8小时；而其

中星体运动速度很大，大约300公里/秒，所以，它的相对论性效应较大，引力辐射较强．加之，这颗星的各种参数能较好地加以确定，所以，对引力辐射的影响可以定量地计算．比如，引力辐射将把双星的能量慢慢带走，使整个双星体系的能量变小．结果双星的周期将越来越短．理论预计，周期变率应为

$$\frac{dP}{dt}=(-2.403\pm0.002)\times10^{-12}. \qquad (2.4)$$

对 **PSR**1913+16 的周期变化等，已监视了十年以上．图2.4中画出它的周期变小的测量结果，其周期变率为

$$\frac{dP}{dt}=(-2.40\pm0.09)\times10^{-12}. \qquad (2.5)$$

(2.4)与 (2.5) 的一致，使我们对引力波的存在充满信心．

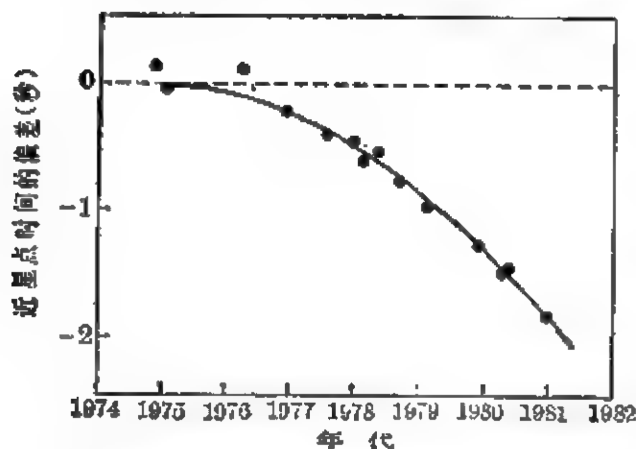


图 2-4 PSR1913+16 的周期变短与引力波理论预言相符

直接探测引力波的关键，是建造高灵敏度的引力波天线．引力波的作用，是使物体发生扭曲和变形．因此，所有引力波天线都是借助于测量极小的扭曲或变形．最简单的天线就是一根棒，在引力波作用下它会伸长缩短而产生应变．目前，测量微小应变的灵敏度已达到 10^{-18}．看来还可以再提高，一直达到由测不准关系给出的量子极限．

另一种天线是用了激光干涉的方法．其原理同一般的干涉仪一样，只是光程特别大，这就容易测量微小的变化．比如用30－40米的光程，应变测量灵敏度可以达到10^{-17}．图 2-5表示一个计划建造的光程长达 5 公里的干涉仪，它的灵敏度估计为10^{-20}．

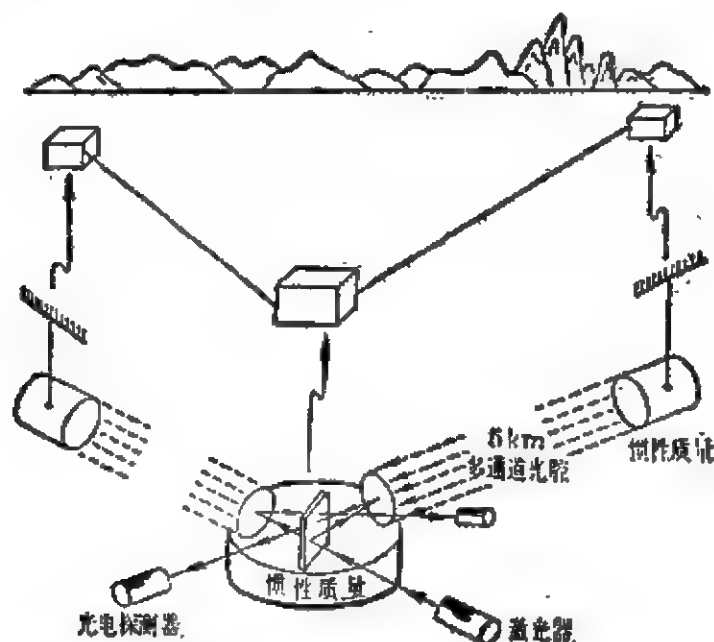


图 2-5　光程长 5 公里的干涉仪示意图

由于地面存在一些不可避免的燥声，像声音、地震等的干扰，再进一步提高灵敏度只有设法将激光干涉仪放到空间中去．在空间放置一个光程10公里的干涉仪，其灵敏度约为10^{-23}．图2-6 就是这种空间干涉仪的一个示意图．

如此灵敏的天线，是否就足以探测到引力波呢？这是一个典型的天体物理问题．因为辐射引力波的源，都是天体体系．在自然界大体有三种类型的引力波：

1．脉冲式的引力波．例如，超新星爆发、致密天体

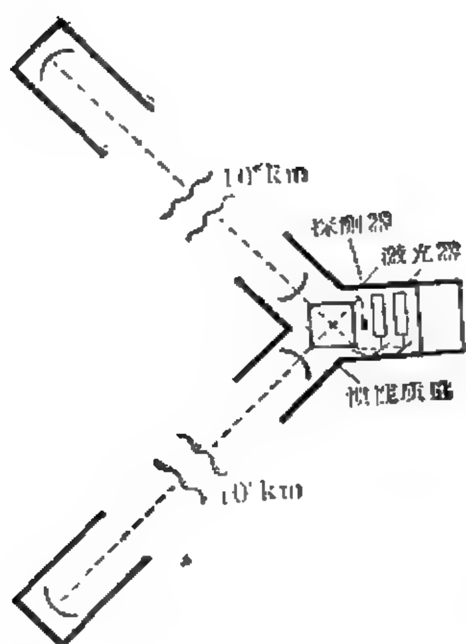


图 2·6 光程 10公里的空间干涉仪示意图

形成等事件，会产生这种引力辐射．它的特点是强度较大，但时间短暂，频带很宽．利用激光干涉仪天线，最适于探测这种引力波．

2．稳定的确定频率的引力波．例如，各种双星、具有大的椭率的转动星等发射这种引力波．它的特点是频率确定，长期稳定，但是强度较小．利用具有频率选择的棒式天线可探测这种引力波．

3．无规的背景辐射的引力波．它是由各种无规运动的辐射遗留下来的，包括宇宙极早期各种过程的辐射，各种双星辐射的迭加，等等．由于这种引力波的作用与其他噪声难于分开，所以是最难测量的．

以上三类引力波的强度，都决定于一些不完全确定的参数，所以，不能做十分确定的计算，也很难预料各种天线是否将有可能探测到引力波．从较为合理的估计看，有的天线可能已接近可探测到引力波的水平．特别，超新星 1987A 的出现，增强了信心．因为，有关 SN1987A 的观测结果支持了引力坍缩理论，所以，根据相同理论所预言的引力波强度，也多半是合理的．我们有相当把握地说，如果出现一颗银河系内的超新星，用现有或将有的引

力波天线，就已可能探测到引力波了.

理论的课题

直到五十年代爱因斯坦去世时，他的广义相对论只有相当少的人在研究，没有什么理论上的进展．六十年代开始，由于相对论天体物理的刺激，开始有越来越多的人去研究广义相对论本身的一些基本问题．其中最重要的成果，有以下几个：

1．引力坍缩．证明质量大于某一临界质量的星体，在其演化末期，不可避免地要发生引力坍缩，形成黑洞．

2．奇点定理．在相当宽的物态条件下证明，引力方程的解必定含有奇性．例如宇宙早期必定有奇性．

3．正能定理．证明任何体系的总能量不可能成为负的．

奇性及坍缩的存在使我们遇到原则性的问题．因为，所谓奇性就是因果规律不再适用之处，这将给以因果性为依据的物理学带来很大的困惑．

为了解脱这个困惑，提出了以下猜想：奇性虽然存在，但我们不可能观测到奇性；或奇性与我们之间原则上不存在联系．这样，至少在与我们有关的范围中，物理学的原则不会被破坏．这个猜想被称为宇宙监督原理．证明或推翻宇宙监督原理，是引力理论面临的重要课题之一．

然而，即使宇宙监督原理被证明了，我们仍然无法完

全摆脱奇性的影响．因为，至少作为大爆炸宇宙起点的奇性，是肯定对我们有影响的．如果宇宙起源于奇性，原则上就不可能研究宇宙的初始条件，也就原则上不可能完全了解我们的宇宙的演化史．

这种情况迫使我们去研究量子引力理论．广义相对论是属于经典物理的，奇性的存在可能只是表明经典理论的适用范围，而非真有什么“灾难”．因此，很早就有人猜测，也许考虑到量子性的引力理论后，奇性就消失了．这种猜测最早得到的支持是黑洞的蒸发．这是1974年由霍金(S. W. Hawking)完成的一项重要研究．按经典理论，黑洞只可吸收不会发射，质量只能增加不能减少．然而，如果考虑黑洞之外的真空具有量子场的起伏，黑洞就可能发射，从而使自身的质量变小．当然，这还不是全面的量子引力论，只是经典引力场与量子场之间的作用．

促使人们加速研究量子引力论的另一个动机来自粒子物理．粒子理论当前最热门的课题之一是寻找统一，即建立不同相互作用之间的统一．弱相互作用与电磁相互作用之间的统一已经完成．大统一理论的目的是将弱、电磁、强三种相互作用都统一在一起．从统一的原则，从统一的具体方案等方面都已显示出必须考虑引力作用与其他作用的统一，即自然界所有相互作用，引力、弱、电磁、强等相互作用的最终的统一．研究这种统一，其实质就是建立量子引力理论．

引力理论与量子理论之间的统一是十分困难的，从

以下的论证可见一斑．首先，引力论中有一条普遍的结论：引力场中不同位置不同速度的钟，将测出不同的时间．因此，精确的时间测量必须精确地知道钟在引力场中的位置及速度．另一方面，量子论则断言：原则上不可能同时精确地知道任何物体的位置及速度．这样，把引力论与量子论两者加在一起，结论就是：原则上不可能进行精确的时间测量．定量而言，时间测量精度不可能超过

$$t_p=\left(\frac{hG}{c^5}\right)^{1/2}=5.3908\times10^{-44}\text{秒}. \qquad (2.6)$$

其中 h 是普朗克常数，c 是光速．上式表示不可能测量比 10^{-44} 秒还小的时间间隔．类似地，长度测量精度也不可能超过

$$l_p=\left(\frac{hG}{c^3}\right)^{1/2}=1.6161\times10^{-33}\text{厘米}. \qquad (2.7)$$

t_p、l_p 分别称为普朗克时间和普朗克长度．

由物理学方法论可知，一个原则上不能直接或间接测定的物理量，在物理学中是没有意义的．这就是说，在小于普朗克时间和普朗克长度的范围，时间和长度概念将失去意义．由时间和长度派生出来的其他概念，如“之前”、“之后”、“早于”、“迟于”等等，也随之失效．总之，引力与量子两者的结合，将导致时空概念本身的改变．这就是量子引力论面对的难题之一．

为了达到引力与量子的统一，已经提出了不少有价值的思想．这里只能简单地列举一下它们的名称（大体

按照出现的年代为序）：

引力正则量子论；

协变微扰理论；

欧几里得量子引力论；

弯曲空间中的量子场论；

诱生引力论；

几何量子化；

缠绕子理论；

离散引力；

平方曲率理论；

非线性量子力学；

自旋网络；

渐近量子化；

量子宇宙学；

超引力理论；

现代 K–K 理论；

超弦理论．

今天，我们还不可能对这些尝试性理论作进一步的评论．也许只能说，量子引力论的成功，大概需要各种尝试之间的协同努力．

三、宇宙学前沿

宇宙学无处不在

古今中外，不少人似乎都很喜欢对宇宙发一通议论，令人感到宇宙的影响无处不在．不过，用科学眼光来衡量，这些议论大都不算宇宙学．因为，作为科学的宇宙学所依靠的是：观测和实验的发现，物理宇宙模型的建立，以及理论和检验之间的对证．然而，“宇宙影响无处不在”的确是对的．

在第一本讨论物理动力学的书——牛顿的《自然哲学之数学原理》——中，已经有宇宙学的内容了．该书中有这样一段话：

> “如果把一个桶吊在一根长绳上，将桶旋转多次而使绳拧紧，然后盛之以水，并使桶与水一道静止不动，接着在另一力的突然作用下，水桶朝反方向旋转，因而当长绳松开时，水桶将继续这种运动．水面最初与桶旋转前一样是平的，但此后桶逐渐把运动传给水，使水旋转起来，并逐渐离开中心而向桶的边缘凹起…….起初，当水在桶中的相对运动最大时，这种相对运动并没有使水产生离开轴心的任何倾向，……而保

持着水平，所以它的真正的圆运动尚未开始．但是，后来水的相对运动减小，水就因此趋向桶的边缘……，这说明水的真正的圆运动在不断增大，一直到水在桶内处在相对静止时达到其最大数量……．”

这是熟知的牛顿水桶实验的原始表述．在这里，“真正的圆运动”就是相对于绝对静止，或相对于宇宙最基本的参考系的运动．因此，水桶实验可以说是第一个企图用局部实验来断定整个宇宙的动力学性质的实验．

牛顿之后的其他物理分支的发展，也曾对宇宙的演化或宇宙的动力学有过有价值的启示．但是，直到广义相对论建立之后，我们才开始有了研究整个宇宙的动力学的有效工具．

标准演化模型

今天，关于整个宇宙的演化，已经有了一个标准的模型，即热大爆炸模型．这种宇宙模型的基本观点是，宇宙整体起源于最初的奇性，或一次最初事件，那时温度极高，密度极大；随后，宇宙空间不断膨胀，温度下降；宇宙间的万事万物，就是在这不断膨胀冷却的有限时间里形成的．

大爆炸宇宙模型，是一种彻底的演化模型，即一切事物都起源于原初的一种事物．所谓演化，是一种从简单纯一到复杂多样的发展过程．如果我们把“简单纯一→

复杂多样”演化观坚持到底，则必定像老子所说的那样：“天下万物生于有，有生于无”，或者“道生一，一生二，二生三，三生万物”.

图 3-1 简单地表述了大爆炸宇宙学所给出的“有生于无”的整个过程．其中纵坐标表示宇宙的年龄，横坐标表示宇宙空间的相对尺度．从图中可见，目前的宇宙年龄大约为 100—200 亿年．另外，空间尺度也在不断增大，即膨胀．图中也标出在各个宇宙时期的主要物理过程．

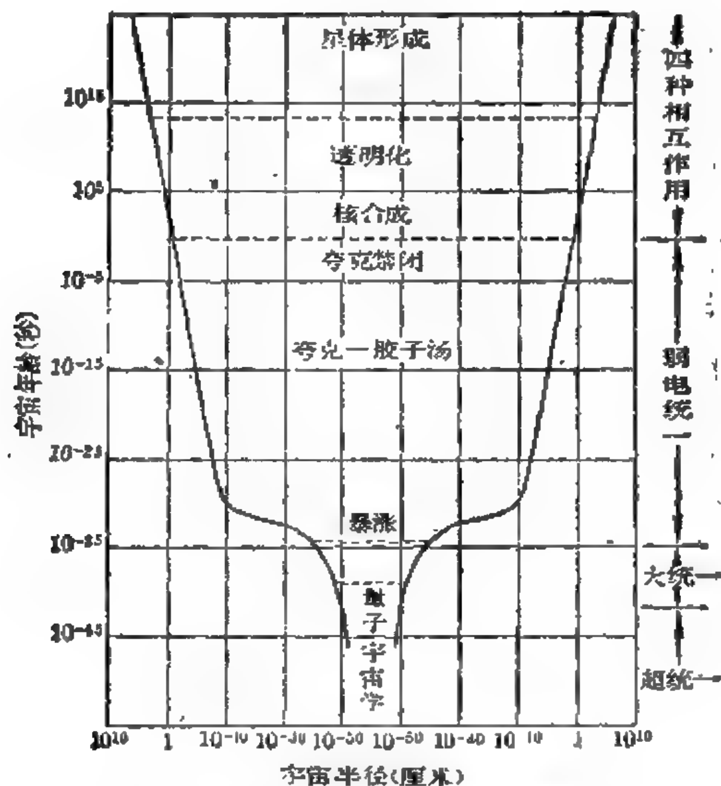


图 3-1 热大爆炸宇宙学简图

1．最早的宇宙时期，称为创生期．相应的宇宙年龄约为10^{-44} 秒．这是时空本身的形成阶段，应当用量子引力论或量子宇宙学描写这一时期的动力学．

2．宇宙极早期．指年龄约为10^{-36}秒的时代．主要物理过程是发生大统一相变，以致宇宙膨胀极快，称为暴涨．此外，宇宙间的不对称也开始形成．夸克、胶子等粒子，也是这一时期的产物．

3．宇宙早期．宇宙年龄在100秒左右，这是各种轻元素的形成时期，特别，宇宙间的^{4}He，D，^{7}Li等主要是在这个时期形成的．所以，也称为核合成时期．

4．近期．当宇宙年龄到十万年时，宇宙温度已下降到4000K，宇宙变成透明．随后，宇宙从相当均匀的状态演化到有各种结构的状态．各种尺度的星体及星体体系，就是在这一时期中逐渐形成的．到现在，宇宙已冷却到约3K，宇宙今龄约200亿年．

热大爆炸宇宙学的主要的观测根据，有以下几个：

1．星系具有系统性红移，距离越大，红移越大；

2．已知最老的恒星或陨石的年龄都不超过200亿年；

3．宇宙间存在各向同性的微波波段的背景辐射，相当于3K的热辐射；

4．各种天体上的^{4}He丰度大体一样，约为30%．

除此之外，还应当强调，目前还没有任何天文或物理的观测实验结果，与大爆炸宇宙学有矛盾．当然，仍然存在许多不清楚或待解决的问题，这就是下面我们逐一要谈的．

一张战略图

热大爆炸宇宙学的发展，是与物理的基础理论的发展相平行的．可以说，物理学每前进一步，我们对宇宙早期的研究也推进一步．因为，宇宙演化的整个过程是从高温到低温，从高能到低能．考察越早期的宇宙学，需要用到能量越高的物理学．另一方面，物理学的发展是从低能到高能的，牛顿力学是能量最低，相互作用最弱的现象的物理学．随着年代的推移，物理学进入越来越高的能量层次．所以，物理学每次向高能范围推进一步，宇宙学就向更早期发展一步．

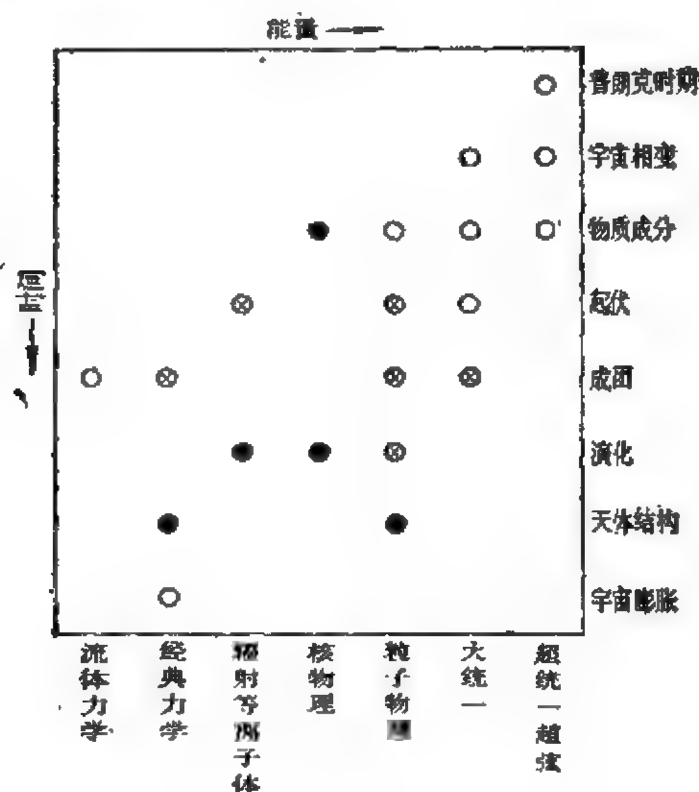


图 3-2　宇宙学研究课题的分布

图 3-2 表示上述的相关发展，其中横轴上列举了各种物理理论，它们从左到右的排列是从低能到高能. 纵轴上列举各种宇宙现象，从上到下的顺序是从宇宙早期到近期. 图中圆点表示宇宙现象与物理理论的相关，即该现象需用哪些理论来加以解释，或者，该种理论与哪些宇宙现象联系.

从图 3-2 看到，圆点分布在一个从左下到右上的斜带上，这表示低能物理对应于宇宙近期，高能物理对应于宇宙早期. 高能物理学现在的任务是寻求万物运动的统一规律，宇宙学是寻求万物的统一起源. 图 3-2 充分表示了，寻求统一规律和寻求统一起源两者，似乎是一件事的两个方面，两者是相辅相成的. 这就是宇宙学越来越深入地进入物理主流的原因.

图 3-2 中还标志出在各个领域中工作成熟的程度. 总的说，左下端的宇宙学比较成熟，越向右上越不成熟. 图 3-2 中的实心圆表示在该课题上已有获得诺贝尔物理学奖的工作，它们分别是：射电综合孔径方法与射电源计数；脉冲星的发现；微波背景辐射；核天体物理学与元素起源；白矮星质量上限与引力坍缩. 得奖年代也大约是先左下后右上. 根据这种历史趋势，似乎可以外推，下一批获得成功的候选者应是图 3-2 中标有⊗的课题. 这些课题正是目前宇宙学的前沿所在. 因此，图 3-2 可称为宇宙学研究的战略图.

两 个 宇 宙 数

按照标准宇宙学模型，宇宙空间膨胀的动力学性质由两个数描写，一是哈勃(E. P. Hubble)常数 H_0，一是减速参数 q_0. 哈勃常数 H_0 描写现今宇宙的膨胀率，即相距单位距离上的两点相对的膨胀速度. 减速参数 q_0 描写膨胀速度的减慢.

从三十年代直到五十年代，宇宙学的主要课题就是确定 H_0 以及 q_0，因为那时宇宙学与其他物理联系极少，只有几何宇宙学是可以观测研究的. 尽管测定H_0、q_0两个数已有几十年的历史，但是目前的精度仍然不高. 现在已知 H_0 的范围是

$$H_0 \sim (50—100)\text{千米}/(\text{秒}\cdot\text{百万秒差距}),$$

即有因子为 2 的误差. q_0 的精度更差，大约的范围是

$$q_0 \sim 0.1—2.$$

H_0 及 q_0 两个数，是膨胀宇宙模型的基础. 例如，宇宙年龄也将由 H_0 及 q_0 来确定. 目前我们不知道足够精确的宇宙年龄，根源也在于 H_0、q_0 的不确定性. 所以，精确地测定 H_0、q_0 有重要价值.

测定 H_0 的关键，在于河外天体的距离测量. 用现有的地面设备对遥远天体距离进行测量，尚有很大误差. 空间望远镜的第一个任务就是提高 H_0 的精度. 提高距离测量精度的方法是，用空间望远镜探测遥远星系中的超新星，由此来确定该星系的距离.

q_0 更难加以测定．一种方案是直接测量宇宙膨胀加速度．当 q_0 大时，膨胀的减速较快；q_0 小时，膨胀的减速较慢．因此，不同的 q_0，宇宙膨胀引起的宇宙体积的变化是不一样的．只要能定量地确定宇宙体积的变化，就可以得知 q_0．星系计数是一种确定宇宙体积变化的有效方法．所谓星系计数，是测量不同红移的星系的数密度．因为不同红移相当于不同时代，所以，由星系计数即可知星系数密度的演化．另外，由于星系寿命较长，在相当长的时间里，星系总数目大体不变．因此，星系数密度的演化实质是宇宙空间膨胀的结果．最近，用这种方法得到的 q_0 值为

$$q_0 = 0.5 \pm 0.25.$$

这个结果很有意义，因为 $q_0 = \frac{1}{2}$ 所对应的宇宙空间的曲率为 0，即宇宙是平坦的．后面将讲到的暴涨宇宙学，恰恰要求宇宙应是平坦的．

核 合 成

热大爆炸宇宙学最成功之点，是说明了轻元素的起源．按照这一模型，在宇宙早期，没有任何化学元素，只有中子、质子、电子、中微子及光子等粒子．当宇宙年龄约为 100 秒时，宇宙冷却到可以进行核合成，即中子、质子合成轻的原子核．各种轻核的产量可以根据核截面及宇宙模型有关数据加以计算．

核合成过程首先形成氘，然后迅速形成大量的 ^{4}He。因为 ^{4}He 是更稳定的核．^{4}He 的产量取决于两个因子：核合成时代的重子密度及宇宙膨胀率．重子密度可以根据现今的重子与光子密度之比求出．膨胀率则决定于轻粒子(即中微子、光子等)的种类数．由此求得 ^{4}He 的丰度为 23—27%，这与观测符合得很好．

对其他轻元素丰度，也可以做类似的预言．图3-3中画出理论计算结果，即一些轻元素，如 D，^{3}He，^{7}Li 等的丰度作为现今的重子密度或重子数与光子数之比的函数．D，^{4}He，^{7}Li 的观测结果也画在图 3-3 中．理论与观测之间是不矛盾的．

利用这个成功的理论，还可以得到其他方面的知识．核合成时代的宇宙膨胀率决定于轻粒子的种类数，因此

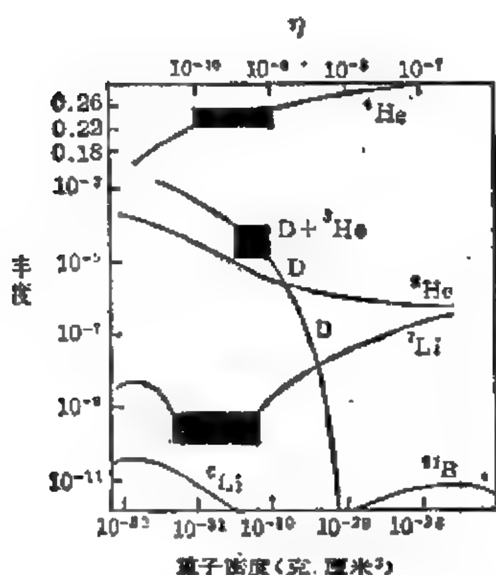


图 3-3　宇宙早期的核合成曲线为理论预言，黑方为观察值

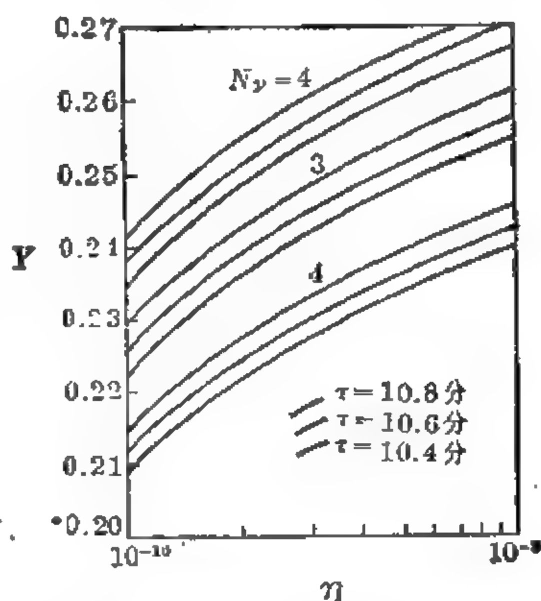


图 3-4　^{4}He 丰度 Y 对中微子种类数 N_ν 及中子寿命 τ 的依赖关系，η 为宇宙重子数与光子数之比

也就决定于中微子的种类数．一般说，轻粒子的种类越多，宇宙膨胀越快，^{4}He 的丰度也越高．所以，中微子种类数越大，则 ^{4}He 丰度应越高．这样，应用 ^{4}He 丰度的观测值，可以给出中微子种类数的一个上限．图3-4表明求上限的方法．图中纵坐标表示 ^{4}He 丰度，横坐标是现今宇宙中的重子数密度与光子数密度之比，τ 是中子的寿命，N_ν 为中微子的种类数．由图3-4看到，若取 $\tau=10.4$ 分，$\eta>4\times10^{-10}$，并取 ^{4}He 丰度的观测上限为 25%，则得到 $N_\gamma\leqslant4$．

现今已知有三种中微子，即电中微子、μ中微子、τ中微子．所以，上述上限是一项非常“危险”的预言，即若再发现一种以上的中微子，就可能破坏宇宙学上限．然而，事情的发展越来越证明宇宙学的预言是正确的．因为根据 Z^0 粒子的宽度也可以给出中微子上限．在1984年时，粒子物理实验给出的上限是 $N_\nu<10^5$，1985 年初达到 $N_\nu<20$，到 1985 年夏下降到 $N_\nu<5.4\pm1$，可以说它与宇宙学上限完全一致．这是核合成理论的又一次成功．

利用核合成理论，还可以推论出一些物理常数，特别是引力常数 G，在不同宇宙时代，这些数值应是一样的，不可能有明显变化，即它的确是常数．另外，核合成理论还表明，宇宙早期不可能有明显的各向异性．总之，利用核合成去讨论对其他物理分支的约束，正在发展之中，这充分表明，宇宙学不只讨论宇宙本身的演化，而且它有能力对其他物理领域作出预言．在这个意义上，可以说，宇宙学也具有应用性．

微波背景辐射

宇宙学之所以有迅速进展，是由于我们认识到，就整体角度看，宇宙是相当均匀一致的．亦即，宇宙是一个较简单的体系．支持这种观念的最主要事实，是微波背景辐射．自从1965年发现这种辐射以后，二十多年来用多种不同的探测手段对它进行了测量．现在已经充分证明，宇宙间弥漫着微波波段的背景辐射．它的谱型是热辐射谱，即黑体谱，相应温度是 $T=2.74\pm0.03K$．图3-5中给出对背景辐射谱的测量结果．

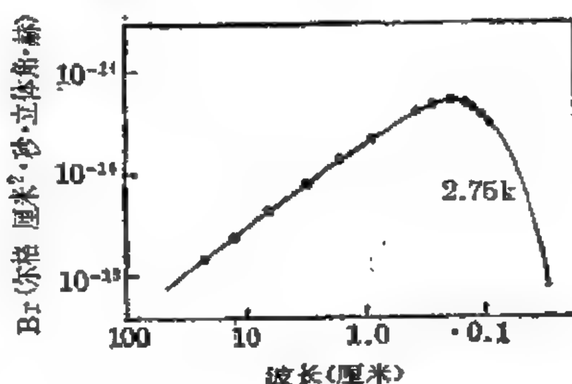


图 3-5　宇宙微波背景辐射的观测结果

更重要的是，这种背景辐射有极好的各向同性．各方向上的辐射，温度是相当一致的．定量地说，各向异性不大于万分之一．这直接证明，宇宙是相当均匀的．

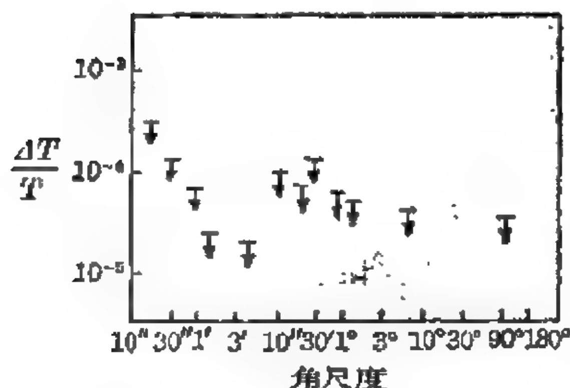


图 3-6　各种角尺度上的微波背景辐射的各向异性观测结果

探测微波背景辐射的各向异性，是一个重要的观测宇宙学课题．最新的

结果是，在数弧分的尺度上，背景辐射温度的起伏的上限是：$\frac{\Delta T}{T}<2\times10^{-5}$．图3-6 画出在各个角尺度上测量所给出的上限．美国空间计划中所预想的 LDR（大型组合反射望远镜）是一个30米直径的望远镜．其目的之一就是企图能测量10^{-6} 水平上的背景温度起伏 $\Delta T/T$．

大尺度结构的形成

与微波背景辐射的性质相反，现今宇宙中的物质的分布是相当不均匀的，有各种尺度的成团结构，例如，恒星成团为星系，星系成团为星系团，星系团又形成更大尺度的超星系团，等等．另外，除了星系之外，可直接观测的天体还有类星体，射电源，星系际云，等等．

这一事实向宇宙学提出两方面的任务：一是分析各种天体各种尺度上的成团特性；一是研究这些结构是如何生成的．

我们熟悉的小尺度天体，如太阳、恒星、银河，都具有相当良好的对称性，或是球状的，或是盘状的．尺度再大，就没有如此明显的对称性了．图 3-7 是一张星系分布图，其中每一个点代表一个星系．显然，它们的分布相当不规则，有的是片状，有的是带状，也有的是纤维状．乍看起来，它们似乎没有规律．最近才注意到，如果用分形几何去分析星系的分布，就会看到有很好的规律性．当然，为了进一步弄清楚这种性质，需要更好的观测样本．所

以，提供大范围中的星系或其他天体的三维分布样本，是观测宇宙学中的具有基本意义的工作.

有了好的样本，还可以研究不同红移范围中天体的成团性质，这相当于研究成团性质的演化.另外,不同类型天体的成团性质的差别，也提供我们极有用的知识.

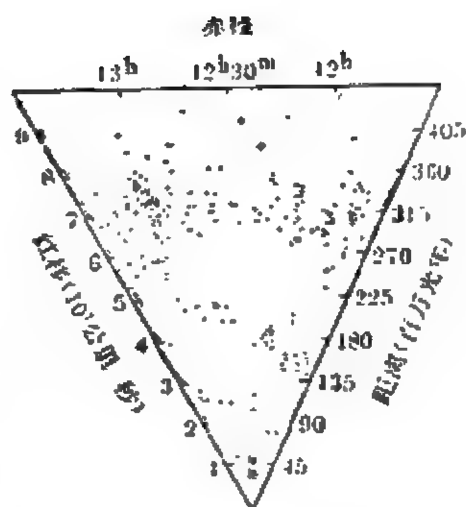


图 3-7 星系的分布

天体结构的形成,是个尚未完全解决的课题,也是宇宙学的难题之一. 如上所述，今天的宇宙是相当不均匀的. 可是，在微波背景辐射形成的时代，宇宙还是非常均匀的. 如何在不长的宇宙期间，从均匀的状态演化到非均匀的状态，机制是什么? 至今还没有成熟的答案. 但有一点可以肯定,如果在微波背景辐射形成时代,物质的非均匀性只有10^{-5}(由 $\Delta T/T$ 给出的上限)，则不可能演化到如今的非均匀性.解决这个困难的途径,是认为宇宙间存在大量暗物质,早在微波背景辐射时,暗物质就有明显成团. 因暗物质与辐射作用很弱，故暗物质的非均匀性不会导致大的背景辐射各向异性.

已有不少证据表明,宇宙间存在大量暗物质. 例如，观测证明在星系发光区之外存在不发光的晕，其质量比星系发光区的质量还大.从星系团的动力学,也证明有大量物质是不发光的. 1980年注意到中微子的静质量可能

不为0，只要每个中微子具有数 eV 的静质量．宇宙间的质量就主要由中微子贡献．随后，粒子物理提供了一个很大的粒子名单，它们都是由新的粒子理论所预言的一些超弱相互作用粒子，它们都可能存在于宇宙的暗物质中．

这样，宇宙结构形成问题现在已经归结为研究宇宙中暗物质的成分、性质，以及研究哪一种暗物质的作用在结构形成中起关键作用．

流行的模型之一，是宇宙弦模型．按照这种模型，宇宙中的非均匀性是由宇宙极早期中的相变过程引起的．相变会导致缺陷，即非均匀性．在宇宙极早期所发生的大统一理论中的对称破缺相变，有可能产生线状的缺陷，即宇宙弦．宇宙弦形成后，将逐渐演变成环状结构，称为宇宙弦环．弦环吸引周围物质，引起成团．一般说，大的弦环形成大的体系，小的弦环形成小尺度天体．

宇宙弦模型只有一个参数，即单位弦长的质量，这个值由粒子物理参数确定．宇宙弦模型能说明一系列观测结果，主要有：1.星系分布的相关函数；2.星系分布中的分形性质；3.巨洞的存在；4.微波背景辐射的各向异性；5.具有对称位形的天体的尺度上限．

从宇宙弦模型看到，甚至宇宙大尺度结构的定量特征，也是由粒子物理的参数所决定的．

宇宙的暴涨

现在我们再来仔细谈一下大统一相变．如前所述，

现今宇宙间存在四种相互作用：强、电磁、弱、引力．按照热大爆观，这四种相互作用也是逐一生成的．在宇宙创生期附近，宇宙间只有对称性极高的统一的一种相互作用．随着温度的降低，逐步发生各种真空相变，这才逐一产生各种相互作用(参见图 3-8)．

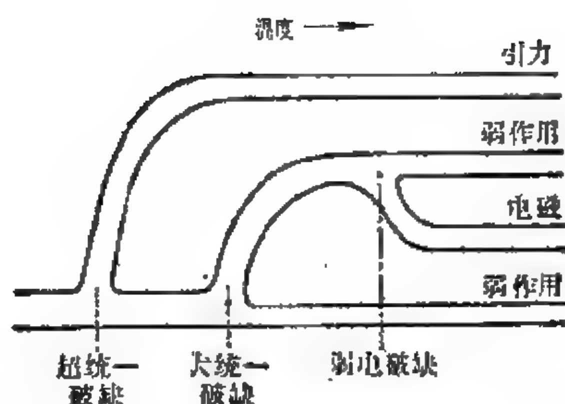


图 3-8 各种相互作用是在宇宙温度下降时逐一产生的

由图 3-8 可知，大统一相变就是强作用形成的时代．大统一相变有可能提供弦状缺陷，便于我们解释结构的形成．但同时，大统一相变也可能引起点状缺陷，这就是磁单极子．在标准的热大爆炸模型中，如此产生的磁单极子的数密度是很大的．这将给宇宙学带来困难，因为我们并没有观测到任何磁单极子．只有美国斯坦福大学的卡伯来拉(B. Cabrera)宣称他的仪器在1982年 2 月14日探测到了一个磁单极子．所以，即使磁单极子存在，它的数密度一定也是非常小的．这就是有名的“磁单极子短缺问题”．

为了解决这个困难，发展了暴涨模型．宇宙暴涨的基本思想是，在大统一相变时，宇宙空间有极快速的膨胀．因为相变时，一些标量场真空能量值不为零，保持常数．当宇宙膨胀后，这些真空能量可能变成宇宙间能量的主导成分．在真空能为主导的情况下，宇宙膨胀要比通常大

爆炸模型中的膨胀快得多．正是由于这种快速膨胀，磁单极子的密度变小，以致今天我们观测不到它．

暴涨宇宙学还解释了另外两个重要的宇宙学问题．

1．视界问题．由微波背景辐射的高度各向同性可以推论，各处微波背景辐射之间应当是有联系的，否则无法解释为什么不同方向上的辐射完全相同．在标准宇宙学模型中，在定量上不能解释如此大范围上的相互联系．在暴涨宇宙模型中，膨胀很快，使具有相互联系的范围迅速变大，即视界迅速变大，从而解决了上述困难．

2．平性．按照标准宇宙学，宇宙空间曲率可能有三种：正曲率、负曲率、零曲率．曲率的符号决定于宇宙物质的平均密度与临界密度之比．所谓临界密度，定义为 $3H_0^2/8\pi G$．如果平均密度大于临界密度，则曲率为正；平均密度小于临界密度，则曲率为负；当平均密度与临界密度相等时，曲率为零．按各种测量平均密度的方法所给出的值，平均密度偏离临界密度不大，即宇宙空间曲率近于0．为什么宇宙大约是平的？暴涨宇宙学也给出一个合理的定量解．按这种模型，不论宇宙原来的情况，在暴涨之后，宇宙应变成相当理想的平宇宙．我们还知道，宇宙减速参数 q_0 也直接和平均密度与临界密度之比有关，当两者相等时，$q_0=\frac{1}{2}$．所以，暴涨宇宙模型同时也预言 $q_0=\frac{1}{2}$．前面讲到，目前关于 q_0 的测量结果恰恰支持了暴涨观．

暴涨宇宙模型是粒子物理与宇宙学的重要接口之

一．进一步的问题是：在粒子物理中，是否能直接发现引至相变的标量场粒子；在宇宙学中，是研究暴涨结束时，能否给出正确的粒子生成和非均匀初始条件，即同后继的膨胀能否正确衔接.

宇宙创生期

在宇宙创生期，时空尺度分别是普朗克时间 t_p，普朗克长度 l_p，参见公式(2.6)、(2.7). 在这种尺度上，经典的时间空间概念失效了，时空不再是一个提供各种物理过程表演的平坦舞台，而成了一个动力学量. 所以，宇宙创生期就是宇宙时空的形成期.

研究宇宙创生期的方法，和研究其他时期完全一样. 我们需要寻找一些可观测的现象，它实质是宇宙早期留下来的，从这些遗留物性质就可以得到宇宙各时期的信息. 表 3.1 中列出宇宙各个时期的主要遗留物.

表 3.1　宇宙各时期主要遗留物

宇宙时代(年龄)	遗　留　物
10^{-44} 秒	时空拓扑
10^{-36} 秒	大尺度非均匀性
3 分	轻元素丰度
10^{5} 年	微波背景辐射
$\sim 10^{10}$ 年	大红移天体

关于其他时期的遗留物，我们已经介绍过了. 现在讨论一下 10^{-44} 时的时空拓扑.

既然在普朗克时期宇宙整体时空拓扑是动力学量，时空形成理论就应当能预言宇宙创生期的时空拓扑．另一方面，普朗克时期之后，宇宙时空性质由经典引力理论，即广义相对论描写．在广义相对论中，时空曲率等局部性质是动力学量，而时空拓扑这种整体性质不再是动力学量，因此，今天的时空整体拓扑应与宇宙创生期形成的拓扑一样．这就提供了研究宇宙创生的一个途径．

时空动力学需要用量子引力理论研究．上一章已讲过，目前还没有成熟的量子引力理论，尽管如此，已经得到了一些初步的有价值的结果．在各种量子理论中，都一致认识到，宇宙空间体积越大，越不容易生成．对于无限空间，生成概率应为零．另一方面，暴涨宇宙学要求空间是平坦的．如果平坦空间的整体拓扑是单连通的，其空间总体积为无限；在多连通拓扑情况，空间总体积可能为有限．这样得出的结论是：宇宙空间可能是多连通的．

从观测宇宙学角度研究宇宙空间是否是多连通的，成为一个有价值的前沿．目前还没有十分清楚的证据证明或否定关于多连通的预言．

宇宙创生期的另一个遗留物，可能是无规的引力辐射背景．由于引力波作用极弱，在宇宙创生期产生的引力波就可以一直存在到今天．但是，由于缺乏完整的量子引力理论，我们不能定量地预言到底有多么强的引力波背景在创生期产生．在创生期之后的许多物理过程也都会产生无规引力波背景，因此，如无定量预言就很难判

断现今宇宙中的无规引力波背景是不是宇宙创生期遗留下来的．也许可以较合理地说，在极低频范围，即 10^{-7}Hz 以下，引力波背景主要是来自创生期的．

至于探测低频引力波背景，一种有效的方法是利用毫秒脉冲星的脉冲到达时间的漂移．因为低频引力波的作用会使脉冲星与地球之间的距离发生无规起伏，导致脉冲到达时间的漂移．对漂移量的观测结果，就可以得到引力波背景强度的一个上限．

另一个属于创生期的问题，是宇宙的维度．现今的宇宙是三维空间一维时间．然而，许多理论认为自然界的维度实质要高得多，大大高于 3+1 维，只是由于其他维度都已紧化，我们不能直接观测到这些额外的维度．但在创生期中，各个维度之间可能是平权的．因此，关于维度的问题是：额外的维度是如何紧化的？紧化了的维度留下了什么可观测遗迹？从这些问题看到，研究创生期动力学和研究量子引力论、超统一理论等两个方面，已完全合而为一了．

四、高能天体物理前沿

高能天体物理缘起

很容易确定天体物理诞生的日子，也很容易确定现代宇宙学诞生的日子．前者由基尔霍夫的太阳光谱观测确定，后者由爱因斯坦发表第一个宇宙解确定．但是，很难确定高能天体物理诞生的日子．也许，可以作为高能天体物理诞生标志的，是巴德(W. Baade)和兹维基(F. Zwicky)于1934年发表的一篇论文，题目为《超新星和宇宙线》．文章很短，照录如下：

> 在每个星系(星云)中，每几百年要发生一次超新星爆发．一个超新星寿命大约是二十天，当它们绝对亮度极大时，可高达 $M_v=-14^m$．超新星的可见辐射 L_v 大约为我们太阳辐射的10^8倍，即 $L_v=3.78\times10^{41}$ 尔格/秒．计算指出，总辐射(包括可见的和不可见的在内)数量大约是 $L_r=10^7L_v=3.78\times10^{48}$ 尔格/秒．所以，超新星在它的寿命中发射的总能量为 $E_r\geqslant10^5\ L_r=3.78\times10^{53}$ 尔格．如果超新星最初是十分普通的质量为 $M<10^{34}$ 克的恒星，则 E_r/c^2 与它本身的 M 同量级．在超新星过程中，大块的物质

湮灭了．此外，还可以设想，宇宙线是由超新星产生的．假定在每个星云中每一千年左右有一颗超新星出现，则地球上所观测到的宇宙线强度的数量级应为 $\sigma = 2\times10^{-3}$ 尔格/(厘米^2·秒)．观测值约为 $\sigma = 3\times10^{-3}$ 尔格/(厘米^2·秒)．作为存照，我们还提出这样的观点：超新星是表示从普通星到中子星的过渡．所谓中子星，就是星的最终阶段，它完全由挤得极紧的中子构成．

巴德和兹维基的这篇短文，几乎覆盖了现今高能天体物理学的全部课题．即：超新星；超新星爆发与星系；引力坍缩与致密星(中子星、黑洞)；宇宙线．

高能天体物理的真正发展，是六十年代以来的事．因为，直到六十年代才具备了研究高能天体物理的必要条件：理论条件及观测条件．理论条件主要是建立了恒星演化理论；观测条件主要是空间探测及地下探测的发展．

恒 星 的 演 化

恒星有千千万万．恒星的性质主要用两个参数来表示，一是恒星表面的温度，一是恒星的亮度，或绝对星等．恒星表面温度分布在二、三千 K 到四、五万 K 范围中，绝对星等分布在正十余等到负五、六等范围．用表面温度作横坐标，绝对星等作纵坐标，每个恒星在这种图上都应是一个点．这种图最早是丹麦天文学家赫兹普隆(E.He-

rtzsprung)和美国天文学家罗素(H. N. Russell)在1905年到1913年间开始使用的，故称为“赫罗图”．恒星在赫罗图上的位置分别集中在几个区域中（参见图4-1）．大多数星处在斜贯全图的一条窄带上．处在这条带上的星称作“主序星”．对主序星，温度越高，绝对光度越大．太阳是颗主序星，它的表面温度约六千K，它正处在主序星的中段，还有较少的星位于图的右上部，它们是些光度较大而表面温度较低的恒星，称为红巨星、亚巨星及超巨星等．还有为数更少的星，散见于图的下部，它们是些温度较高但光度很小的白矮星．

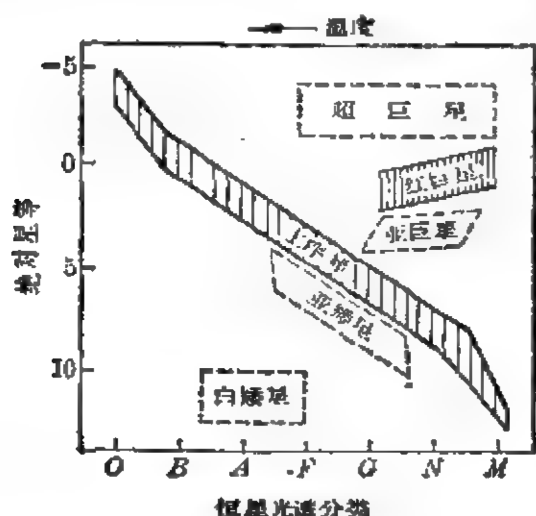


图 4-1 恒星在赫罗图上的分布

之所以有如此不同种类的星，就是由于星的演化．按照现行的理论，恒星是从弥漫的气云收缩而成的，气云的成分主要是氢．由于收缩，气云的温度不断升高而开始发光，当它内部温度高到数百万K以上时，就开始发生热核反应，氢聚变成较重的元素，并以辐射形式释放出大量能量．到这时，一颗恒星就正式诞生了．恒星形成之后，就处在主序星阶段，在该阶段，恒星非常稳定，它的光度和表面温度在极长的时间中可以说保持不变．质量越大的主序星，温度越高，光度也越大，所以主序星在赫罗图上分布成一条斜带．正因为恒星在这个阶段停留时间很

长，所以我们看到的星大部分都是主序星．待到恒星核心中的氢耗尽之后，就到了一个转变期．这时，恒星核心部分发生收缩，温度升高，辐射增加，而星体的外层在强大的辐射作用下迅速胀大，成了一个大而发红的星，就是红巨星．恒星在红巨星阶段停留时间较短，所以看到的也就较少．

演化到红巨星之后，恒星有几条不同的出路．质量较小的红巨星，最后会坍缩而形成白矮星．质量大于 5 个太阳质量以上的红巨星，当其核心坍缩后会导致星体外层的大爆发，这就是超新星．爆发过程以光能、动能及宇宙线能的形式放出大量能量，其核心部分则形成白矮星、中子星或黑洞等致密天体．图 4-2 表示了各种质量星体的演化过程．

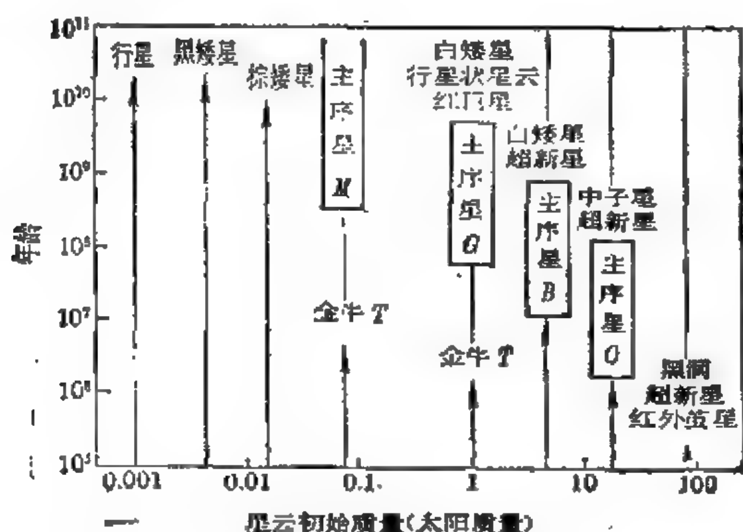


图 4-2　各种质量星体的演化过程

引力坍缩

如前所述，当恒星核心部分的核能源用尽之后，由于失去维持恒星平衡的热压力，在自身引力的作用下，恒星将发生大坍缩．在坍缩过程中，有大量引力势能释放出来，所以，引力坍缩是许多高能天体物理现象的根源．

一个具有太阳质量及太阳大小的星体核，坍缩到10公里大小时，总共应释放引力能约10^{53}尔格．可是，由光学测量知道，超新星放出的总光能和总动能都约为10^{51}尔格，即都只有总引力能的1%．因此，引力坍缩的能量并不主要由光能及爆发动能释放出来．

超新星的放能，主要是以发射中微子的方式来完成的．在引力坍缩中，有大量的中微子生成，生成中微子的方式有两种，一种是星体中质子在坍缩时逐渐变成中子，即以$p+e^{-}\rightarrow n+\nu_e$方式放射中微子$\nu_e$；另一种方式是热中微子，即当坍缩的核心密度变得很高，达到10^{11}克/厘米^{3}时，物质对于中微子是不透明的．这时，由于电子与中微子之间有反应，$e^{+}+e^{-}\rightleftarrows\nu+\bar{\nu}$，形成大量热中微子，并参与发射．这种中微子的温度，约为100—1000亿度．

所以，引力坍缩，或者超新星爆发，首先应是中微子发射的爆发，而光发射是次要的．研究引力坍缩过程中能量如何释放，是前沿课题之一．特别，早已注意到，超新星发生的频次太少．如果恒星晚期都要经历一次超新星

爆发，则平均而言应当每十余年在银河中就应有一次超新星爆发，而实际上要上百年才有一颗．所以，很可能存在暗的超新星爆发，即发光很弱的超新星．当然，这种超新星仍是强的中微子源．这种观点得到超新星1987A的支持．已经注意到这颗超新星的光度比“标准”的超新星低得多，而中微子却符合标准引力坍缩理论的预言．如果的确存在大量暗超新星，则一方面可以解释上述的频次矛盾，另一方面也提出，用中微子观测有可能发现更多的超新星．

中微子天文学

第一章中已经提及日本、美国、欧洲等几个天文观测站接收到了来自超新星 1987A 的中微子．这件事已经成了河外中微子天文学诞生的标志．

这些观测站中的接收器，大都是用水作为工作物质．比如，日本神冈的装置就是一个充满水的容器，装有2140吨水．在水箱周围布满上千个光电倍增管，用以记录高能电子在水中引起的契连科夫辐射．这种装置有两种方式记录中微子，一种是电子散射过程，即

$$\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-,$$

$$\bar{\nu} + e^- \rightarrow \bar{\nu} + e^-;$$

另一种是捕获过程，即

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n.$$

这两种反应都可能产生高能的电子或正电子，从而被记

录下来.

从中微子天文学中，人们可以获得许多用光学望远镜不能得到的知识．比如，虽然用光学方法能看到超新星爆发,但不能探知超新星内部的引力坍缩.用中微子天文学则可以进行这项研究.因为中微子是弱作用粒子,它有极强的穿透本领．哪怕在星体核心产生的中微子，也有可能不经碰撞地穿透到星体之外．这些中微子携带着丰富的有关星体核心的信息.

利用接收到的来自超新星1987A的中微子，就可以推知超新星核心引力坍缩后的温度.其方法,和光学天体物理相同．我们知道,根据星光的颜色,就可以推得星体表面的温度，如黄色的温度约为 6000K，红色的低于 6000K,蓝色的高于 6000K．所谓颜色,就是光子的平均能量．因此,根据中微子的平均能量(4MeV)，我们就能算出相应温度,即大约一百亿 K 以上．这完全符合关于引力坍缩的理论推断．这是中微子天文学上的第一项成就.

其实,在此之前,中微子天文学已颇有名气，不过不是以成功而有名,相反,是由于失败．这就是太阳中微子短缺．太阳中心的核反应也会放出大量的中微子,对此,在地球上也是可测的．特别，因为太阳的光度等有很准确的值,所以,对中微子的预言也是非常确定的．如图4-3 所示,太阳光度为 3.86×10^{33} 尔格/秒，中微子强度应为 1.8×10^{38} 个/秒，落到地球上的流强应为 6.6×10^{10} 个/秒·厘米^2。

美国布鲁克海文实验室进行了太阳中微子探测．他们在南达科他的霍姆斯代克金矿中安放探测器，用C_2Cl_4作为工作物质，利用反应 $\nu_e + {}^{37}Cl \to e^- + {}^{37}Ar$ 来探测中微子．按理论预计，在他们的体积为3.8×10^5厘米^{3}的C_2Cl_4探测器中，每周应当约有 12 个 ^{37}Ar 产生，而实际上只有 3 个，即只有理论值的 25 %．这是一个严重的矛盾．

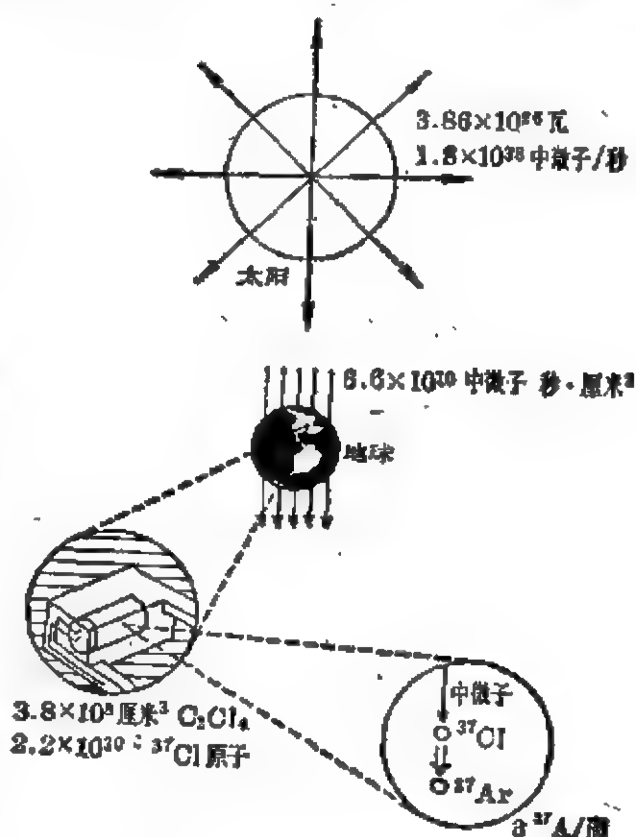


图 4-3 对太阳中微子的探测

目前，解释这个矛盾的最成功的模型，是中微子振荡，即不同种类的中微子之间可能发生转变．太阳核心所产生的电子中微子，在通过太阳物质飞出太阳时，有相当部分已转变成μ中微子，以致发生电中微子短缺．

进一步的观测检验正在安排，其方案是用^{71}Ga做工作物质，用反应 $\nu_e + {}^{71}Ga \to e^- + {}^{71}Ge$来测量太阳中微子．这种反应对探测太阳中微子来说更加有效．另外，有的设计除探测中微子数外，还准备探测更多的物理量，包括能量、到达时间、到达方向，等等．

脉冲星与中子星

引力坍缩之后可能形成中子星，这一理论是脉冲星发现之后才得到证实的．1967 年，英国剑桥大学天文学家建造了一架射电望远镜，用来研究行星际闪烁现象．工作波段是 81.5MHz．又因为闪烁是很快的，所以该望远镜应有高的时间分辨率．这样，望远镜的接收面积就很大．建成后，它竟占地三十亩，是一个 16×128 个偶极天线阵．

这个望远镜已写进了天文史，不是因为它研究闪烁有功，而是它发现了脉冲星．脉冲星是周期地发射射电脉冲的星体．最初发现的脉冲星，周期约在 1 秒．八十年代以来，又发现一批周期只有毫秒量级的脉冲星．已知周期最短的脉冲星为 GX339-4，其周期为 1.13 毫秒．

脉冲星周期如此之短，而周期又非常稳定，稳定度达到 10^{-9} 以上．因此，脉冲星是中子星，即它是由完全挤紧的中子物质构成的星体．它的物质密度极高，达到 10^{14} 克/厘米^3．中子星很小，半径只有数十公里．因此，中子星可以高速转动而不撒掉．我们观测到的脉冲是由于中子星有束状的射电发射，它每转一圈，该射电束扫过地球一次，我们就接收到一个脉冲．脉冲星是高速转动的中子星这一论断，现在已被公认了．

脉冲星的进一步的研究，分成了两个方面，一是外

层辐射过程的研究，一是内层中子星结构的研究．

外层研究也就是脉冲星的磁层研究．因为束状发射主要是由磁场导致的，中子星具有强的偶极磁场．并且，磁轴与转轴既不平行也不反平行．因此，这种几何位形在形式上是与地球磁层相似的．但就空间尺度及磁场强度而言，脉冲星磁层与地球磁层是十分不同的．后者可称为低能磁层，前者则是高能磁层．这两种磁层的有些物理过程是相似的，但也有十分不同之点．例如，高能磁层中可能有电子对产生过程，而低能磁层中则没有．由此相应将导致波及稳定性方面的差别．这正是天体等离子体物理中的重要课题之一．

至于脉冲星内部，则是核物理问题为主了．中子星的结构是高密态物理学的极好应用．关于各种核物质物态方程对中子星结构的影响，已经研究得十分多了．另外，一些特殊核态，如反常中子态、超子态、夸克-胶子态，在中子星中存在的可能性，也已有广泛的讨论．图 4-4 说明现有关于高密高温物态的理解．普通的核只占其中一很小范围，而中子星在图中处于重要地位．可见，就研究高密的核物质而言，中子星的确是一个非常有用的对象．

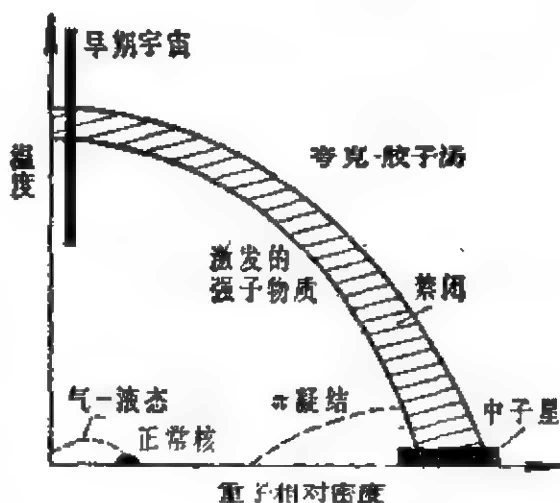


图 4-4　高温高压下的物态

利用中子星来研究核的性质的一个例子是星震．早就观测到，有的脉冲星的周期会有突然的变短．图4-5表示船帆座脉冲星的周期随时间的变化．在一般情况，周期随时间变长，这是由于转动能损失所致．但是，有时会出现周期跳跃式地变短，这是由于星震导致转动惯量突然变小所致．

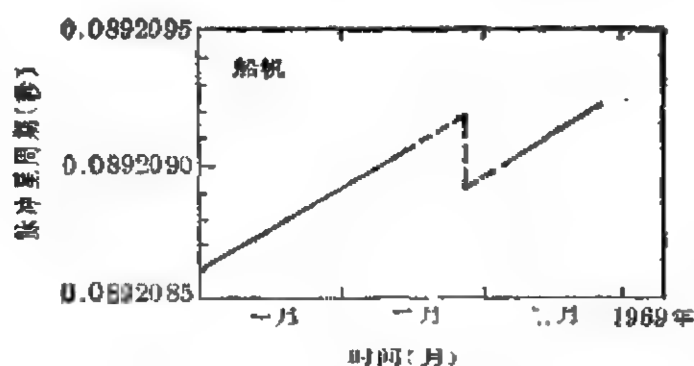


图 4-5 船帆座脉冲星的周期的跳跃式变化

有趣的是，一些高自旋核有十分相似的现象．图 4-6 表示 ^{158}Er 的转动周期随时间的变化，其形式与图 4-5 几乎完全一样，只是尺度不同．图 4-6 中画出的周期突然变短，称为核震，其效果也是使核的转动惯量变小．

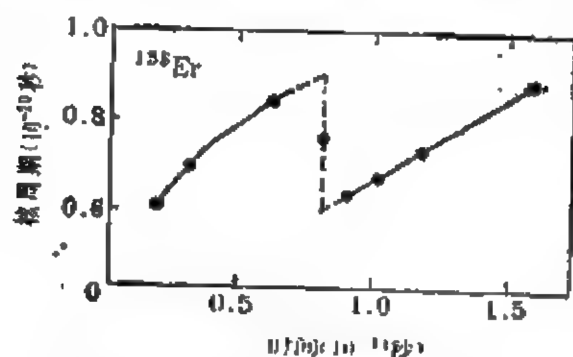


图 4-6 ^{158}Er 的转动周期的跳跃式变化

星震与核震当然不是由于全同的机制，但也有共性，它们都是由于内部物质的重排而造成的．核震与核子的成对有密切关系，而星震则可能由于中子星中的涡旋结构．在尺度相差如此之大的核及星体上，存在

着如此对应的物理，充分显示了物理规律的普适性.

黑　　洞

中子星的质量有一个上限，其值大约在3个太阳质量左右. 质量大于上限的星，引力坍缩后不能形成稳定的中子星，而将形成黑洞. 黑洞是引力非常强的空间范围，其中的光也不能逃离黑洞. 黑洞的可能存在，象中子星一样，也是三十年代就预言了. 同样，它也是直到六十年代才受到重视，成为天体物理中最常见的名词之一.

黑洞本身是不发光的，所以，要直接观测它们是十分困难的. 但是，当有物质掉向黑洞时，物质受到强引力场的加速变热，就会发光，这种光是可以探测的. 在双星系统中，就有可能发生这种过程. 双星是两颗星组成的体系，相互绕着共同的质心旋转. 如果双星中一颗是普通的星，一颗是黑洞，那么正常星中的物质就会不断落入黑洞而发光，这种过程称为黑洞的吸积. 含有一个黑洞的双星体系的势能图画在图4-7中. 其中正常星仍在进行核燃烧，它具有宽而

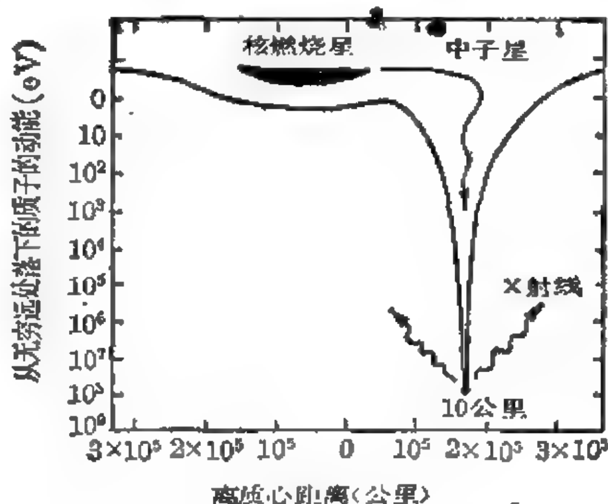


图 4-7　包含一个黑洞的双星的势能图

浅的势阱．另一个深而窄的势阱是中子星，或者黑洞．当气体从正常星落到中子星或黑洞上时，每个质子可以获得 10^8eV 的能量，这种能量以光的形式放射出来，主要是X射线波段的辐射．

七十年代以来，X射线天文学的确发现了一些X射线双星．观测表明，黑洞理论是成功的，甚至我们已有相当把握确定那颗星很可能是黑洞．符合黑洞理论的观测证据有以下几点：

1．存在X射线双星．

2．有些X射线双星，其强度有脉冲式变化，脉冲周期非常稳定．这种X射线源的质量都小于中子星质量上限．所以，这种源实质上是由一颗正常星及一颗中子星构成的体系．

3．有些X射线双星其强度的变化是不规则的，没有任何周期性．这种X射线源的质量都大于中子星质量上限．所以，这种源很可能是黑洞，因为黑洞的磁轴不可能偏离它的转轴，故不可能有规则的周期性变化．

4．已观测到，一个属于3的X射线源，即天鹅座X-1，其X射线强度有毫秒级的变化，这说明该源的尺度很小，符合黑洞的量级．

当然，我们并不能完全肯定天鹅座 X-1 是黑洞，但用黑洞模型来解释上述观测结果是十分自然的．按照这种判据，大麦云中的 LMC-X3 也很可能是黑洞．

大质量黑洞模型目前在天体物理中也成为一种流行的模型．这种黑洞质量在 10^6—10^9 太阳质量的范围．它们

不是一次坍缩而成的，而是吸积了许多恒星之后，聚积起来的．这种模型常用来做为活动星系核及类星体的模型．从能量角度看这个模型是成功的，活动星系核及类星体的高能现象不难用大质量黑洞加以说明．在上述天体中心有一大质量黑洞，它吸积恒星等物质而放出大量能量．比之恒星晚期的黑洞理论，有关类星体或活动星系核的大黑洞模型还是相当不成熟的．有许多理论的及观测的工作有待于完成．

吸积及喷流

上面已经多次提到过吸积．现在它已经发展成一个非常重要的天体物理课题．因为致密天体（中子星，黑洞等）的发光，高能粒子的产生或加速，都是在吸积过程中完成的．

按几何形态来分类，有球对称的吸积以及盘状的吸积．前者是被吸积物质球对称地落入中心的致密天体．如果被吸积物相对于中心星体具有角动量，则由于角动量守恒，围绕着中心致密星将形成盘状结构，称为吸积盘．

在动力学方面，吸积所包含的问题有以下几个方面：定态的吸积模型；各种吸积解的稳定性；吸积模式的变化，等等．在辐射方面，吸积所包含的问题是：辐射的总强度；辐射谱（热谱，幂律谱，谱指数）；辐射的变化；发射线等．显然，上述诸问题大都属于流体力学范畴．由于吸

积物温度很高，物质电离，也由于中心致密星一般是有磁场的，所以，吸盘物理一般也是磁流体力学及等离子体的研究课题.

同吸积盘紧密相关的另一个问题是喷流.至今，我们还不能直接看到吸积盘，但喷流却已是观测得相当仔细的现象了. 射电天文学很早发现，许多射电源两旁具有大体对称的两个子源. 进一步又发现许多子源迅速地向外运动，图 4-8 画出类星体 3C345 的两个射电子源随时间的变化.这种图景很容易使人想到，两个子源是由中心天体向相反的两个方向喷出的物质或光. 这就是喷流模型.精细观测更发现，一个具有喷流的射电源，它的大尺度上的喷流方向同小尺度上的喷流方向惊人地平行. 图 4-9是 NGC6251 的射电流量图. 从图中很清楚地看到，这个源具有喷流，而且小尺度上的喷流与大尺度上的喷流方向完全吻合.

更应提及的是，不只射电源这种大尺度天体具有喷

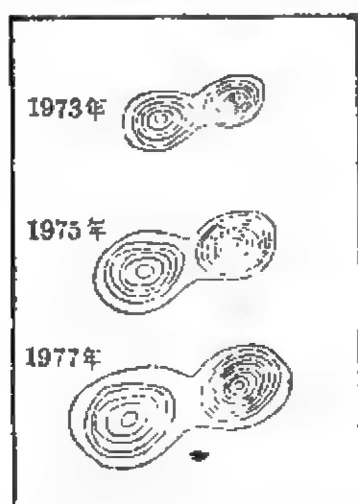


图 4-8 类星体 3C345 的两个射电子源随时间的变化

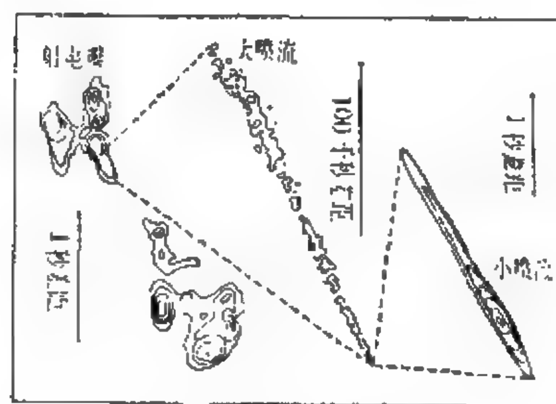


图 4-9 射电源 NGC6251 的喷流，在不同尺度上的喷流方向完全平行

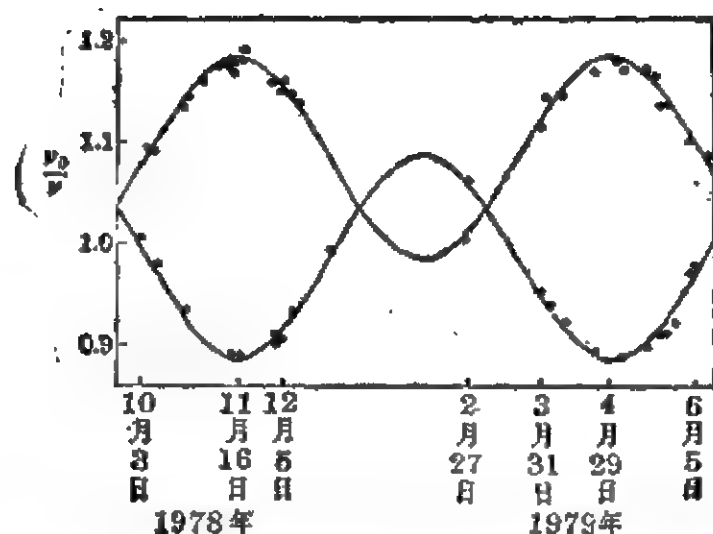
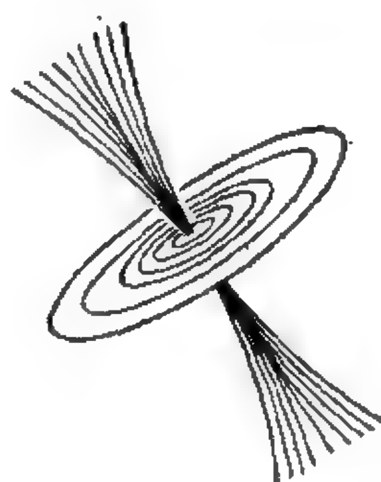


图 4-10 SS433 有两组发射线，二者频率有周期性变化，但位相相反，说明是由两个反向的喷流形成的

流，而且恒星尺度的致密天体也有喷流.最典型的喷流天体，是 SS433.已经公认，SS433 是一颗致密星，它的模型是致密星周围有一吸积盘，沿着盘的轴，有喷流射出.由于盘的进动也导致喷流进动.因此，喷流上的辐射将有红移蓝移的周期性变化.图4-10表示来自 SS433 上下两个喷流的辐射的波长有周期性的变化.

射电源或类星体的尺度要比恒星大上百万倍，但其喷流的性质却十分相似.的确，目前对两种喷流几乎采用完全相同的模型去说明．这种模型的简图如图4-11所示．它的中心是一黑洞，吸积盘围绕着它.黑洞不断“吞食”缠绕着它的磁场，因之，不断去掉缠绕把磁场理


图 4-11 黑洞吸积盘产生喷流模型示意图

顺．这一有序磁场与旋转黑洞所产生的引力"磁场"相作用，产生高达10^{20}伏的势，它将加速粒子形成喷流．

形成喷流这种问题很难用分析方法解决．要求助于数值方法．数值相对论也是引力物理中的一种新方法．它用数值计算去解决难求分析解的问题，如引力波发射，非球吸盘过程，喷流的形成等．

宇　宙　线

宇宙线物理直接研究来自地外空间的各种高能核或粒子．显然，这些核或粒子的成分、起源、传播等都是天体物理感兴趣的．它极有助于了解元素的起源，核合成过程，天体中的加速机制等．

首先，宇宙线探测告诉我们各种核在宇宙间的丰度，即相对含量．太阳系中的元素丰度已经知道得相当详细，因为除了根据太阳光谱以外，还可以直接分析陨石、月岩等样品．根据放射性同位素已知太阳系年龄大约为46亿年．因此，太阳系中的元素丰度应当就是46亿年前银河系中元素丰度的一个代表．这使我们研究银河系的化学演化有了一个参考点．

最近发现，银河系的元素丰度与太阳系的结果有差别．这可能反映太阳系元素丰度并不是星际空间的元素丰度的典型代表，或者在银河系中元素分布有非均匀性．这种非均匀性如何起源，如何再变成均匀等等，正是银河系演化问题中的前沿．

另外，比 Ni 重的元素是靠中子捕获过程形成的，即较重的核捕获中子后形成更重的核．按照核合成理论，有两种中子捕获过程：一种叫慢过程(s 过程)，它主要在红巨星上发生，由红巨星产生的中子引起中子捕获；另一种叫快过程(r 过程)，它主要在超新星爆发时发生．s 过程与 r 过程产生不同的元素丰度．根据现有丰度数据已经清楚，现有太阳系中的元素是 s 过程及 r 过程的混合结果．仔细地研究各丰度的差别，也许会得到一幅更清楚的元素生成史．

宇宙线粒子虽少，却集中了大量能量．银河系发射的宇宙线粒子的强度达到 10^{41} 尔格/秒，它比银河系的X射线强度高十倍．为什么这些粒子具有如此高的能量，这些能量是如何集中到少数粒子上的．这就是宇宙线的加速问题．宇宙线大都是由高能天体发射出来的．像超新星、中子星、活动星系核、射电源、类星体等，都可能是宇宙线源．因此，在这些高能天体上必定存在有效的加速机制．我们在宇宙线中已观测到能量高达 10^{20}eV 的粒子，它比现有加速器中产生的高能粒子的能量高得多．

一种流行的加速机制是激波．例如当超新星爆发时，就存在有效加速粒子的激波．现在还不能说激波机制是否一定可靠．因为需要仔细研究能量在 10^{13}—10^{16}eV 范围的宇宙线粒子成分及能谱，才能对激波模型进行检验．最近发现，X 射线双星天鹅座 X-3 发射能量高达 10^{15}eV 的光子．它的产生一定是与某种极高能粒子过程有关．对此，至今没有成熟的解释．为了弄清楚它，应当发展新的

宇宙线探测器，用以研究发射 TeV 能量级的宇宙射线的点源.

从宇宙射线源发射出高能粒子，它在星际空间中经历漫长时间后到达地球，在这种传播过程中，它要经受碰撞、散射、分裂等等作用.从银河系观点来看，宇宙线是一种相对论性气体.如何在银河系中维持或保存这种气体，也是一个有趣的问题.因为宇宙线能量很高，从它产生到飞出银河系，平均只要一千年，但实际发现，宇宙线粒子在银河系中的逗留时间平均为10^7年.其原因还十分不清楚. 这当然与银河系中的磁场有关.另外，还须考虑到在星际空间中次级宇宙线的产生. 原初的高能宇宙线粒子与星际物质碰撞将产生次级的宇宙线，这些过程同样会加长宇宙线在银河系中的逗留时间.

宇宙线物理中还有一些富有宇宙学含义的课题，我们只简单列举如下：

反粒子，反核的丰度；

宇宙线的极高能量 10^{20}eV 与 3K 背景辐射；

磁单极子的寻找.

所有这些，都是在下一个十年里将被关注的课题.

五、观测横断面

射电天文学

有一次，在英国剑桥大学的穆拉德射电天文台举办一个小型展览．每个参观者首先看到的是一张桌子上放着一迭白纸；接着要求每个参观者拿一张白纸，这不免有点莫名其妙；把手中的白纸翻过来一看才明白，原来纸的背面写着：你可知道，当你从桌上拿起这张纸片时，所付出的能量比全世界全部射电望远镜在其全部历史中所接收的能量还要大！这个有名的玩笑，使人对射电望远镜的灵敏程度，印象深刻．的确，射电天文学在二次大战之后的迅速发展，已使它成为观测天体物理学中最强的分支之一．

射电望远镜的发展，是从小天线到大的抛物天线，从单镜到综合孔径处理，从短基线干涉测量到长基线干涉仪．它的灵敏度、角分辨率、时间分辨率、频带覆盖等方面，都有极大提高．

美国国立射电天文台的甚大阵(VLA)，是目前工作得最好的射电望远镜之一．它由27个25米直径的天线组成．空间分辨率达到1角秒，和最好的光学望远镜相当．灵敏度达到1毫央斯基(相当于10^{-29}瓦/(米^2·赫))．

下一个受人注目的计划，是甚长基线阵(VLBA). 它是长基线干涉仪和综合孔径射电望远镜的结合. 现在的方案是，它由10个25米天线组成，分布于整个美国，从东部的新英格兰到太平洋夏威夷. 最长基线为8000公里，最短基线为200公里. 角分辨率可达 10^{-4} 角秒，这比最好的光学望远镜要高 2—3 个量级. 相对定位精度可达10^{-6}角秒. 对河外射电源，线分辨率可达 1 秒差距. 对银河系中射电源，线分辨率约为 1 天文单位(即日地距离). 它的观测频段从 7 毫米到 90 厘米，共 10 个波段.

射电观测所涉及的课题，除了前几章提及的之外，还有以下一些是较重要的：

1. 星际分子；

2. 微波激射源结构；

3. 射电星系的双子源结构；

4. 双子源的超光速运动；

5. 对活动星系核的监视；

6. 星系团及星系群中的质量分布：星系、气体及暗物质的相对分布.

分子的低能级之间的跃迁正好在射频波段，加之，星际尘埃对这种射电波的吸收极小，所以，用射电波段能看得很远. 由此，已经发现了大约50种星际分子. 利用CO的发射线，可以给出星系中物质分布的一幅简图. 星际分子有十分重要的作用，例如，它可以通过辐射消耗掉星际云的能量，从而使星际云冷却而坍缩. 星际分子对子星系中的核合成和化学演化是十分关键的.

已经注意到，在分子云中的氘丰度略高于平均值.由此可以推出分子云中的电子密度.这个密度值非常有用，因为从分子云坍缩并分裂而形成恒星就要依赖这种自由电子.问题是，至今还缺乏足够精确的分子参数用以了解氘的丰度变高，所以，目前还只能给出电子密度的上限.从这个课题可以看到，射电天文学、分子波谱学以及恒星形成理论这三个领域之间的密切关系.

表明三者关系的另一个课题，是星际微波激射源.1965年，加州大学天文学家发现，在猎户座星云中羟基(OH)有 1665MHz 的强发射线.在正常情况下，这条谱线应比 1667MHz 的谱线强度小一半，而这一次却看不到1667线.如果用热发射机制来解释1665线，要求辐射源温度达10^{13}K.如果真有如此高温，分子早就破坏无遗了.这些矛盾现象迫使人们承认，1665线是受激发射.随后，渐渐发现了许多分子的受激发射.现在认识到，星际分子的受激发射与恒星诞生可能有密切的关系，它们大多出现在那种恒星正在诞生或刚刚诞生的星际云中.当恒星诞生时，有强的红外发射，受激发射的能量可能就是从这种红外发射中获得能量的.

光学和红外

1986年初，美国空间飞船的失事，直接影响了光学天文学的发展.原来计划在1986年8月将用空间飞船把哈勃空间望远镜(HST)放入轨道，由于失事，这个计划到现在

(1988年)还没有实现.

空间望远镜可能是八十年代以来最受天体物理界关心的一项计划了. 的确，它的能力是已有的地面光学望远镜不可比拟的. 我们在第一章里已经提到过它. 现在再做一点介绍.

空间望远镜是一个直径 2.4 米的光学、紫外、红外望远镜.在5000埃的波长上,它能观测的天体可比地面能观测的天体暗弱100倍,它有能力去寻找太阳系之外的其他行星系统.它可观测到 28 等星,从而,已有可能去研究遥远星系中的恒星. 所以,从行星系物理直到宇宙学,它都具有极大的吸引力.

当然,空间望远镜也不能替代地面观测. 事实上,有了空间望远镜之后,更需要地面望远镜的配合.在地面光学望远镜方面,加州理工学院有过光荣的历史.先是在威尔逊山建造了1.5米的海耳望远镜,哈勃就是用这架望远镜证实了宇宙膨胀预言.后来,又在帕洛玛山建造了 5 米望远镜,至今仍是最大最有效的望远镜之一. 现在,加州理工学院又开始着手下一代更大的光学望远镜了. 这就是加州理工学院与加州大学正在联合建造的凯 克 天 文台.这个新天文台位于夏威夷的莫纳克亚山顶,海拔4145米.其中,主要的望远镜是10米的反射镜. 它是用36块分离的六角形小而薄的玻璃装配成的一个大镜面，而不是一整块大面厚的单镜面.

建造这架望远镜耗资巨大，但却有一段竞相赞助的历史. 最初，建造10米望远镜的计划是由加州大学提出

的，一位叫霍夫曼的人捐赠3600万美元，条件是该望远镜以霍夫曼命名.没想到，不久之后，加州理工学院为此计划得到了凯克基金会的捐赠，捐赠7000万美元，条件是该望远镜应以凯克命名.结局当然是以捐赠多者为准，取名"凯克".这个天文台已于1985年9月12日破土动工.预期望远镜将于1991年运转，投入研究.看来，直到2000年左右，凯克天文台将一直是世界上最大的天文台.

返回来再说几句红外天文学.红外和亚毫米波天文学发展时间不长.但早就意识到，对于研究某些天体现象来说，这个波段上的探测是十分关键的.例如，为了研究恒星的诞生，需要观测稠密的坍缩云的内部.然而，这种云常由一层厚厚尘埃包围着.可见光、紫外光都不可能穿透尘埃层.但是，它对于红外光是透明的.可用红外天文学来探知这种坍缩云的内部过程.此外，这种云的温度要比恒星温度低得多，故其发射也恰恰在红外波段.目前，对于触发恒星形成的机制、坍缩云的演化及云化学等，都还了解甚少.这些，都需要有高分辨率和高灵敏度的红外及亚毫米装备.

红外天文学的课题并不只限于恒星起源，它在其他各领域也都是有用的.比如，红外天文卫星(IRSA)已在多方面做出了贡献，这涉及：红外类星体的证认，红外星系的证认；红外星际薄卷云的发现；碳星的发现；恒星半径的测量；红外小行星和彗星的巡天，等等.

有关红外望远镜的下一步计划，最主要的是空间站红外望远镜装置(SIRTF).它是一个孔径为0.85米的望

远镜，用冷冻剂加以冷却．工作波长2—300微米．它的灵敏度要比现有天文红外卫星高1000倍．能看到可观测宇宙的极限．

更大的设想则是10米级的大型组合反射望远镜(LDR)．它也工作于空间，工作波长在20微米到1毫米之间．它具有低噪声、宽频带的特点．它的观测课题在第三章中已提到，即确定在10^{-6}水平上的背景辐射的各向异性．另外，它还有助于寻找红移高达Z～3的原初星系．

国际紫外探险者

提到紫外天文学，就不能不提到国际紫外探险者(IUE)．这颗卫星贡献之大，完全超出了原来的预想．按原计划，这颗卫星只能在天空工作三年．可是，如今到了第十个年头，它仍然在工作．是寿命最长的一颗天文卫星．

IUE上的望远镜不大，口径只有45厘米．IUE沿一条椭圆形的同步轨道环绕地球运行，也就是说，它绕地球一周的时间和地球自转一周的时间相等，而卫星在其轨道上的运行并不是匀速的．由于卫星的轨道离地球相当远，地球遮住的天空就不大，约17°．这样，卫星与地面的联系也非常方便．

使用IUE的方法也令人愉快．位于马里兰州的戈达德空间飞行中心，设有IUE望远镜操作中心．在电视屏

幕上可以直接看到星场图像. 从图像中辨认出所要观测的目标后，就可将该目标调到摄谱仪的巨大孔径的中心位置.这样,就可以得到所需要的数据了.

IUE 有许多科学成果. 首先，它使冷星研究进入一个新阶段.在 IUE 上天之前,有关冷星,只能用光学方法研究其光谱中的 H 线和 K 线. 使用 IUE 就可以弄清恒星色球层与星冕之间的过渡区. 也就是说，从色球底部直到星冕的整个恒星大气结构，我们都可以仔细地观测了.

用这种方法发现了过渡区分界线. 这是指在赫罗图(参见图4-1)上,类太阳恒星与不同于太阳的恒星之间的一条分界线. 所谓不同于太阳的恒星，指的是那些有强的色球层而星冕却很弱的天体，这是由于冷星星风的质量损失所造成的. 这种星组成新的一类,叫做混杂恒星.只有通过紫外天文学才能看到这类星的特征.

利用 IUE 还可以观测用其他难于得到的元素丰度.例如,对 A 型特殊恒星以及汞-锰恒星的研究,元素丰度很有价值.已经发现,硼在汞-锰恒星中的含量,远比太阳中的含量多得多.为什么在核合成方面有此差别,仍然是未解决的问题.

IUE 的另一个功绩是发现一种前所未知的新星. 一般新星发射强烈的碳、氧、氮谱线，而新类型的新星发射氖、镁、铝谱线. 这种新星是一种演化到更晚期的恒星的现象.所以,它的重元素含量更多了.

除了直接观测以外,利用 IUE 的档案进行研究，也

是一种有效的方式．IUE 的全部观测结果都被存入IUE档案馆．直接观测者在六个月内对这些资料享有专利权．六个月限期一过，资料就对公众开放．在 IUE 的数据中包含着未被原来观测者充分利用的东西，因此，其中仍然蕴藏着不少未被发现的事情．就新星来说，有些光谱还未被辨别出来．

根据档案进行研究，是天体物理学的一种典型方法．宇宙现象有的时间尺度很长，有的需要几种不同观测结果的对比，所以，保留档案，以备后用，是有难以估量的价值的．最出名的档案研究，也许要推对中国古天文记录的整理及分析．时至今日，我们还从中得到不少极有用的知识，像新星、超新星的记录，就是最有用的档案之一．

因此，档案的收集、整理，提供永久性的使用，已受到广泛关注．最近，有人编出“无专利科学资料分析纲要”，其中包括红外天文卫星(IRAS)、爱因斯坦X射线天文台以及 IUE 的观测资料．这都为档案研究提供了方便．

紫外天文学的下一步，也可能是再发射一个类似于 IUE 的探险者型装置．波长范围主要覆盖从氢的吸收边912埃到1200埃．因为比 1200 埃更长的波，可由空间望远镜观测．

在912—1200埃波段中，有许多对天体物理重要的离子的共振线，如 O^0、N^+、O^{+5} 等．另外，H_2、HD 的电子跃迁也在这个波段．后者的数据，对了解星际云是很重要的．已知类星体光谱中有许多吸收线，它们是由星系际云

的氢的 912 埃吸收引起的.可见,研究星系际云可能也将需要远紫外探测.

X 射线天文学

在高能天体物理一章中，已多次提及X射线天文观测.的确,X射线天文观测与高能天体物理几乎是同时兴起的,即都是从二十世纪六十年代初开始迅速发展的.

1962年,美国用火箭把X射线探测器送到225公里高的空间,发现天蝎座方向上有强大的X射线源,其强度比原来预计的要大 100 倍，当时以为它是许多源发射的总和.接着,用定位精度更高的仪器探测，发现它是一个点状源，这就是X射线天文学发现的第一个源——天蝎座X-1. 1966 年，光学天文学证明天蝎座 X-1 也发可见光,是一颗13等的变星,离我们约 1 千光年. 根据这样的数据可以推知,天蝎座 X-1 的X射线强度比光学波段大一千倍,是个不折不扣的X射线星.从此,我们认识到,有不少天体主要是发射X射线,这些都是高能天体.

为了对这些 X 射线源进行长时间的观测,弄清它们的结构,必须用卫星观测才行.1970年12月12日，在肯尼亚东海岸外的印度洋上，发射了美国的第一颗X射线天文卫星,那一天正值肯尼亚独立日,所以用斯瓦希利语的“自由”一词——“乌呼鲁”来命名. 乌呼鲁的工作非常成功.它最初的 70 天就把X射线源数目增加到125个.这些源中,有银河系内的,也有银河系外的.其中,重要的一种

是X射线双星，我们在讨论中子星及黑洞时，已多次提及这类双星。

制造X射线卫星耗资昂贵，许多天体物理学家又没有足够的经费，于是，人们便因陋就简，利用气球载运X射线探测器，来进行X射线天文观测。一项最出色的气球X射线天文学成就，是发现了武仙座 X-1 的强磁场。这个实验是由联邦德国的高能天体物理学家完成的。他们于 1976 年 5 月 3 日放射了一个气球，对武仙座 X-1 的 15—125 keV 的辐射作了 4 小时观测。他们在 X 射线谱中发现一个强而窄的峰，位于 53keV。解释这个峰的一个最自然的模型，是电子在强磁场中朗道能级跃迁。从而推出，武仙座 X-1 中应有强达 10^{13} 高能的磁场。再之，由于峰很窄，所以，这些共振发射应出自磁场变化较小的范围，由此可以推知发射区大小的上限。若磁场是偶极的，则发射区所占面积应不大于整个星体面积的1%。

大体在相同的年代，几个卫星都看到了短时标的X射线爆发。参与这个发现的有三个X射线天文学小组，他们分别用三个不同的X射线卫星。一个是荷兰天文卫星(ANS)；一个是船帆 5 卫星(Vela)；一个是 SAS-3。一个典型的X射线爆发源是在 0.5—1 秒内，X射线强度猛增 20—50 倍，然后强度慢慢下降约 10 秒后又回到常态。关于这种现象的解释，还众说不一。有的认为是大质量黑洞导致，有的认为是中子星外吸积盘中的核过程，有的认为是中子星磁层中的不稳定性。

七十年代末期，美国又放射了两个重要的X射线天

文卫星，它们都属于高能天文台(HEAO)系列.其中第一个是全天X射线巡天装置，第二个又称为爱因斯坦天文台.后者对X射线源给出的知识的重要性，完全可与光学及射电相比拟. 也就是说，凡是射电及光学可进行测量的量，用 X 射线也可以测量.这包括：X 射线源表，点源的位置的确定，展源的成像，对X射线谱，特别是发射谱的分析.

八十年代初，HEAO 先后停止工作后，X射线天文学由美国转到了日本和欧洲. 因为美国致力于发展空间望远镜，没有再发射X射线卫星. 特别，当超新星1987A爆发时，只有日本的银河卫星在工作，成为唯一的 X 射线天文卫星.

X 射线天文学下一个重要的观测设备，是高级 X 射线天体物理装置(AXAF).它的主体是一个掠射反射镜，直径1.2米.在 0.1keV 到 8keV 的能量范围中，分辨率为0.5角秒. AXAF 的灵敏度，将比爱因斯坦天文台提高约100倍. AXAF 使我们有可能研究红移 $Z=3$ 的星系团. 对于光度与 3C273 相同的类星体，若其 $Z\sim10$，AXAF 仍可观测到. 再有，对于 $Z=2$ 的星系团，它内部气体中的铁 K 线，也可能测到.这样，我们可能用X射线天文学对于红移距离给出一种独立的测量.

γ 射线天文学

现在我们进入电磁波谱的最高端——γ 射线. γ 射

线天文学同样不能在地面发展，因为大气吸收了地外来的 γ 射线．早期对 γ 射线天文学有贡献的是船帆卫星．它于1967年就探测到了宇宙 γ 射线爆发，但是迟至 1973 年才公布这一结果．因为发射船帆卫星原本不是为了天体物理研究，而是为了军事目的，即对全球核爆炸的监视，所以，它的数据是保密的，直到1973年已失去保密价值时才予公开．

γ 射电天文学是研究来自天体的波长短于0.01埃的辐射．关于天体可能发射 γ 射线的理论，早在五十年代末就开始讨论了．观测方面则始于六十年代初．首先，1962 年月球轨道卫星"徘徊者" 3 号和 5 号注意到有宇宙 γ 射线背景辐射．但是，真正研究 γ 射线背景辐射则很难．因为有许多非宇宙的 γ 射线的干扰；这包括大气 γ 射线、大气中子、探测器周围宇宙线同物质相互作用而产生的γ射线，等等．当然，在探测天体 γ 射线发射时，也必须考虑这些干扰．这就是 γ 射线天文学的提出和研究都比 X 射线天文学要早，但其进展却远远落后于 X 射线天文学的原因，至今还难于精确确定 γ 射线源的位置．

对 γ 射线天文学有贡献的几颗天文卫星包括以下几个：探险者系列中的 γ 射线卫星，小型天文卫星 (SAS-2) 以及欧洲的宇宙线观测卫星(COSB)．利用它们的观测结果，可以给出一个 γ 射线源表，包括几十个源，或者集中着源的区域．表中包括著名的类星体 3C273，以及蟹状星云和X射线双星天鹅座 X-3 等．在银河系中心的方向，还观测到能量为 0.5MeV 的 γ 射线．这是由电子正电子

湮没而产生的.

最重要的发现当推 γ 射线爆发. 这种爆发上升时间很短,约0.2秒,然后衰减,总持续时间约为10秒. 一般相信, 这种爆发产生于磁中子星的表面. 最强烈的一次爆发出现于1979年 3 月 5 日,它有异乎寻常的亮度.它的位置可以由不同卫星的到达时间的差异而得出, 已发现它大体位于大麦云中的超新星.如果它的确来自大麦云,并且,如果它的辐射是各向同性的,那么该爆发在亮度最大时,其光度超过银河系的总光度.

总之,在 10^5eV—10^{11}eV 范围中的 γ 射线天文学,对于研究下列问题是非常重要的:

1. 脉冲星发射机制;
2. 银河系中高能粒子的分布;
3. 活动星系核过程;
4. 高能背景辐射的起源;
5. γ 源中的物质成分及状态;
6. γ 射线爆发的本质.

γ 射线天文学的下一个大型观测装置, 预期是 γ 射线天文台(GRO). 它的工作范围大体是10^4eV到 2×10^{10} eV. GRO 的灵敏度在整个波段上都要比以前的探测器至少高一个量级. 角分辨率也将大大提高, GRO 的设计,是为了研究 γ 射线爆发以及 γ 射线发射线谱.

另外一个想法是专门观测 γ 射线的瞬变源. 因为这种源可能是(除了宇宙极早期之外)宇宙间最高温高压之所在.为此,应发射 γ 射线瞬变探险者,用来监视全天,提

供一个巡天数据．同时，用一高分辨率的硬X射线准直器确定γ射线爆发的位置，使位置精度达到约1角分．这样就容易寻找光学对应体．当然，也应有高分辨率的X射线谱仪，用以测量发射线的能量和轮廓，以及回旋共振的特征．

至于能量高于10^{11}eV的γ射线，反以用地面设备观测为宜．因为如此高能的光子，流量很低，天空测量效率不高；而另一方面，这种光子能在大气中产生高能粒子簇射，簇射中的粒子又产生大气切连科夫辐射．这就给地面探测提供了可能性．

发现权上的竞争

上面分别讨论了各个波段上观测手段及观测研究的发展．从观测天体物理学的整体来看，各个领域之间的竞争是十分激烈的．我们可以根据各种不同的观测手段所拥有的发现权的多少来衡量它们对天体物理学的贡献．所谓发现权，是指一种重要的天体现象首先是由那种观测手段发现的，则该项发现权就属于那种观测手段．

表5.1中列有直到二次大战为止一些公认的重要天文发现．我们看到，除了宇宙线一项之外，其他都是用光学方法得到的．所以，天文学及天体物理学一直是光学天文学的天下．

二次大战之后，形势开始大变．表5.2中列举了战后四十年来的重要发现．其中最后一栏指明发现权是属于

表 5.1 早期天文发现

年　代	天 文 现 象
远古	星
远古	行星
远古	新星
1577	彗星
1610	卫星
1655	环
1754	星团
1785	星系团
1798	行星际物质
1801	小行星
1803	聚星
1861	具有星云状物质的变星
1864	行星状星云
1865	电离气云
1903	冷的星际气体
1910	巨星，主序星
1912	宇宙线
1912	脉动星
1915	白矮星
1917	星系
1929	宇宙膨胀
1930	星际尘埃
1934	新星，超新星
1939	星系中的气体
1942	超新星遗迹

那一种观测手段.我们看到,天文发现不再由光学天文学独占了,已呈各种手段的均分的局面.表 5.3 中列出各种方法相应的发现数．从中可以定量地看到各种手段所占

表 5.2 近期的重要天文发现

年代	天文现象	发现权
1946	射电星系	射电
1947	磁变星	光学
1949	耀星	光学
1952	哈勃常数确定	光学
1957	星际磁场	射电
1962	X射线星	X射线
1962	X射线背景	X射线
1963	类星体	光学、射电
1965	微波背景	射电
1965	红外星	红外
1966	X射线星系	X射线
1968	脉冲星	射电
1968	星际分子	射电
1970	红外星系	红外
1971	超光速源	射电
1973	γ射线暴	γ射线
1976	太阳中微子短缺	中微子
1978	巨洞	光学
1979	双星引力辐射	射电
1980	D丰度	紫外
1981	引力透镜	光学
1982	磁单极子短缺	宇宙线
1983	暗晕、暗物质	光学
1984	超短周期脉冲星	射电
1985	极高能γ射线	宇宙线
1985	超星系团结构	光学
1987	超新星1987A	中微子，光学

有的分额.虽然光学天文学仍然领先，但它只占总发现权中的三分之一．如果我们只计及获得诺贝尔奖的天文发

表 5.3　各种观测方法的发现数

观测方法	发现权数
射电	9
红外	2
光学	9
紫外	1
X射线	3
γ射线	1
宇宙线(包括中微子)	4

现,那么射电天文的积分甚至比光学天文还要高. 表 5.2 中三项获奖的发现:射电星系、微波背景辐射、脉冲星,都是用射电方法得到的.

当然,不同观测手段之间的竞争,是合作式的竞争,因为天体物理是一个整体,并具有相当的综合性.一项天体物理成果,往往是多种研究方法,多种观测手段,多种理论领域协同的结果. 表 5.2 已经显示出了这一点,比如,类星体的发现,是光学与射电的协同结果,超新星 1987A 中包含着光学天文学与中微子天文学之间的协同.看来,在未来的天体物理研究中将会有越来越多越广泛的协同与合作.

参 考 书 目

I. 入门性读物

《今日天体物理》,中国科学技术大学天体物理研究室，上海科学技术出版社.1980.

《宇宙的创生》,方励之、李淑娴著,科学出版社,1987.

Astrophysics Today ed. A. G. W. Cameron AIP, 1984.

Gravitation, Cosmology and Cosmic-Ray Physics, Physics through The 1990s, National Academy Press, 1986.

II. 专门性读物

13th Texas Symposium on Retativistic Astrophysics ed. M. P. Ulmer. World Scientific, 1987.

300 Year of Gravitation, eds. S. W. Hawkings and W. Vsrael, Cambridge 1987.